高等学校教材

自动武器制造工艺学

唐庆源 董存学 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了自动武器制造工艺理论基础，机械加工工艺规程设计和自动武器典型零件的制造与装配。

全书共分九章，包括：自动武器制造过程概述，机械加工精度，机械加工表面质量，结构工艺性，机械加工工艺规程的制订，枪管制造，机匣制造，枪机制造和自动武器的装配。

本书是自动武器专业的专业工艺教材，也可作为机械制造工艺及设备专业的参考书和深孔加工技术研究生的主要参考书，还可作为职工大学、业余大学机械类专业的工艺教材和有关工程技术人员的参考书。

本书由杨惠民主审，经枪炮教学指导委员会陆家鹏委员复查同意作为教材出版。

自动武器制造工艺学

唐庆源　董存学　编著

*

兵器工业出版社 出版

（北京市海淀区车道沟10号）

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

顺义县后沙峪印刷厂印装

*

开本：787×1092　1/16　印张：20.25　字数：496千字

1990年5月第1版　1990年5月第1次印装

印数：1～1000　定价：4.40元

ISBN 7-80038-128-5/TJ.19（课）

（内部发行）

前　言

本书是按照原兵器工业部教材编审室的要求，根据华东工学院与太原机械学院自动武器专业教学计划所规定的学时数（72～80学时）以及其教学大纲所规定的内容而编写的。考虑到尺寸链和机床夹具设计在本专业现已设为独立的课程，且有专著供其使用，所以在本书中不包含上述内容。

本书是在总结过去教学经验、专题研究和生产实践的基础上，吸取国内外先进生产经验和新的科学技术，对原教材进行大量的更新和增删之后而写成的。与原教材相比，加强了工艺理论基础，充实了结构工艺性，突出了工艺规程的制订，增补了科研成果和新的科学技术（如成组技术、计算机辅助制造和单管喷吸钻等）。由于加强了基础，更新了内容，突出了重点，所以本书既适合于兵器生产方面的需要，又可满足军民两用的要求。

本书由华东工学院唐庆源、太原机械学院董存学编著，由唐庆源任主编。书中第一、二、三、四、五、六章由唐庆源编写，第七、八、九章由董存学编写。全书由华东工学院杨惠民教授担任主审，由陆家鹏教授担任责任编委，他们对本书提出了许多宝贵意见，并进行了审改，在此特向他们表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中存在的缺点和错误，实难避免，恳请读者批评指正。

编著者

1987年9月

目　　录

第一章　自动武器制造过程概述

第一节　自动武器的生产过程和工艺过程

一、生产过程和工艺过程

1．生产过程

任何一种产品都有各自的生产过程。产品的生产过程是指由原材料到制成产品之间的各个相互联系的劳动过程的总和。它包括：原材料的运输和保管，生产技术的准备工作，毛坯的制造，零件的加工，部件和产品的装配以及检验、试验、油漆和包装等。

自动武器是一种产品，其生产过程所包括的内容，与上述产品的生产过程相同。

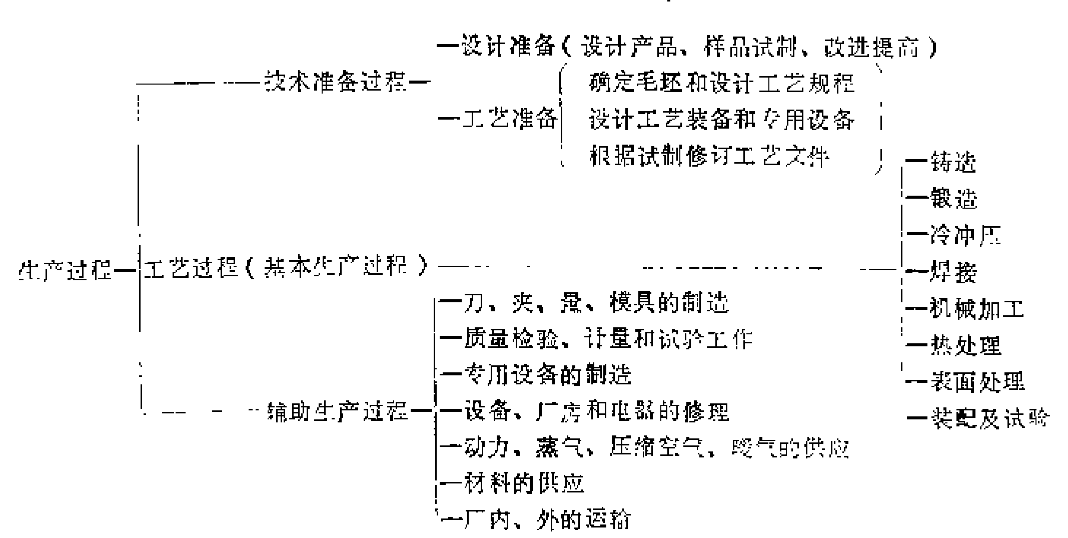
在现代化生产中，某一产品的生产，往往不是由一个工厂来完成，而是由多个工厂协作完成的。一个工厂仅完成生产过程的某些阶段或生产某些零件或部件。这样做，有利于生产的专业化，提高产品质量，提高劳动生产率和降低产品成本。例如生产56式14.5mm 四联高射机枪的工厂，该厂本身只生产枪架的主要部分及整枪的装配，而枪身、瞄准具、轮胎、轴承、滚道用的滚珠等等都是外协件，由其它工厂制造。

一个工厂所负责的那一部分生产过程，称为工厂的生产过程。工厂的生产过程，又可按车间分为若干车间的生产过程。某个工厂或车间所用的原材料或半成品，可能是另一工厂或车间的成品，而它的成品，又可能是某一工厂或车间的半成品。工厂（或车间）的生产过程是产品的生产过程的一部分，它指的是该工厂（或车间）直接把进厂（或车间）的原材料或半成品制造成本厂（或车间）成品的各个劳动过程的总和。

2．工艺过程

在整个生产过程中，占主导地位的是直接改变工件的形状、尺寸及其材料性能使其最终

表1-1　生产过程的构成



成为零件以及将零件、部件装配成成品的那部分生产过程。该部分生产过程称为工艺过程。它包括：铸造、锻造、冷冲压、焊接、机械加工、热处理、表面处理和装配等工艺过程。

在工艺过程中，机械（切削）加工是其主要部分。机械加工工艺过程指的是：利用金属切削机床按一定顺序对毛坯进行加工以达到零件图上所要求的形状和尺寸（有时也包括达到某些机械性能）的全部过程。讨论这一过程是本教材主要内容之一。

表1-1所示为生产过程的构成。

二、机械加工工艺过程的组成

为了便于分析和拟订工艺过程，便于计划、组织生产和进行经济核算，有必要把工艺过程细分为工序、安装、工位、工步、走刀和操作等几个组成部分。

工序　是指一个（或一组）工人，在一个工作地点(或一台机床)上，对一个（或同时对几个）工件所连续完成的那一部分工艺过程。

工序是工艺过程的基本组成部分，是生产、计划管理的基本单元，也是计算设备负荷、确定生产人员数量、技术等级以及工具数量的依据。

构成工序的有四个要素（工作地点、加工对象、工人和连续作业），任一要素的变更即成为新的工序。

图1-1所示为一联轴器，其工艺过程如表1-2所示。

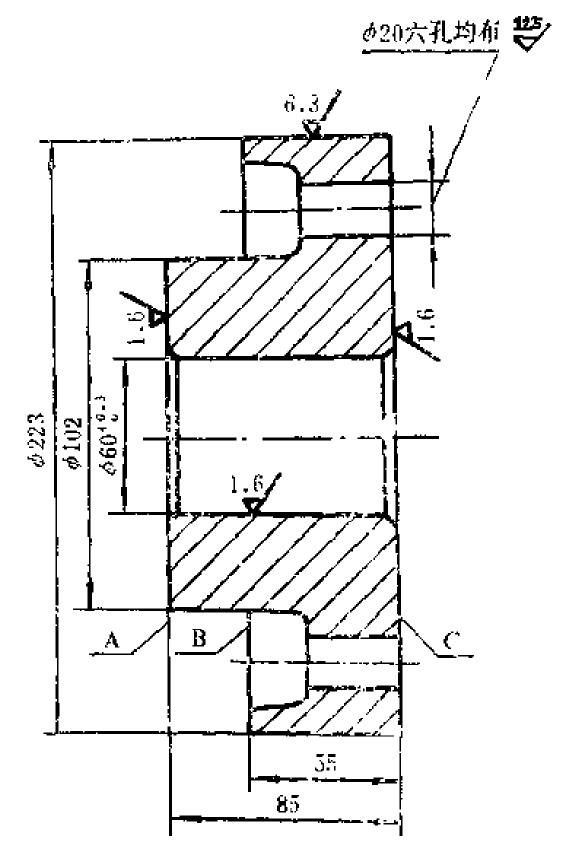


图1-1　联轴器零件图

表1-2　联轴器的加工工艺过程

方案Ⅰ（产量小）			方案Ⅱ（产量较大）		
工序号	工序内容	设备	工序号	工序内容	设备
1	镗孔，车外圆，车端面C、内孔倒角，车端面A、B，内孔倒角	车床	1	镗孔，车外圆，车端面C，内孔倒角	车床
			2	车端面A、B，内孔倒角	车床
2	钻六个均布孔	钻床	3	钻六个均布孔	钻床

安装　工件从装上机床到卸下为止，每装卸一次所完成的那一部分工艺过程称为安装。安装是工序的一部分，在一个工序中，可以只有一次安装，也可以有几次安装。表1-2中的方案Ⅰ，其工序1包含两次安装，而方案Ⅱ中的每个工序均只有一次安装。

在每一个工序中，应尽量减少安装次数。因为多一次安装，就多一个误差，而且增加装

卸工件的辅助时间。为了减少安装次数，常采用不需重新装卸工件而能改变工件位置以加工不同表面的夹具，如各种回转夹具等。

工位　采用转位（或移位）夹具、回转工作台或在多轴机床上加工时，工件在机床上安装后，它在机床上所占据的每一个加工位置称为工位。如图1-2所示圆环体两台阶面的加工，如果在普通铣床上利用回转夹具，则可在一次安装中连续加工出两个台阶。图1-2（a）为加工台阶Ⅰ的情况，当加工完台阶面Ⅰ后，拔出定位销1，将带工件的2转180°，让待加工面Ⅱ进入铣削位置，插入定位销，即可进行加工，见图1-2（b）。采用多工位加工，可以减少安装次数，便于保证加工质量，缩短辅助时间，提高劳动生产率。

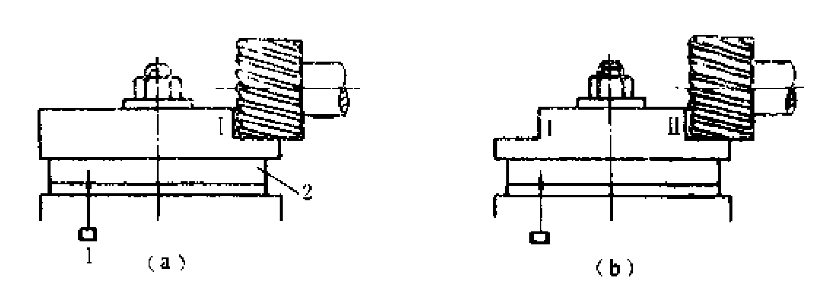


图1-2　圆环体的多工位加工

（a）　工位Ⅰ；　（b）　工位Ⅱ

1—定位销；2—夹具旋转部分

工步　是指被加工表面、切削刀具和切削用量中的转速与进给量均保持不变的情况下所完成的那一部分工艺过程。在表1-2的方案Ⅱ中，其工序1由七个工步组成，即粗、精镗孔，粗、精车外圆，粗、精车端面C和内孔倒角。因粗、精加工所用的刀具和切削用量是不同的，故应算成两个工步。

如果同一零件上的几个加工表面完全相同，所用刀具及切削用量亦不变，为了简化工艺规程，习惯上把它们当作一个工步看待。表1-2中的钻六个均布孔工序即为一个工步。

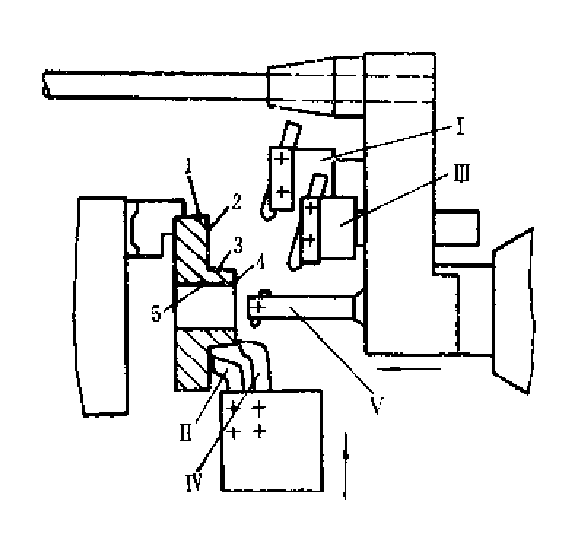


图1-3　复合工步

1、2、3、4、5—被加工表面；Ⅰ、Ⅲ—车外圆；Ⅱ、Ⅳ—车端面；Ⅴ—镗孔

为了提高生产率，有时用几把刀具同时加工几个表面，这种工步称为复合工步。在工艺规程中，亦把它作为一个工步看待。图1-3所示为在六角车床上同时加工几个表面的复合工步的例子。

走刀　一个工步中，若所需切去的金属层很厚，不能一次切完，则可分几次切削，每一次切削称为一次走刀。例如在车床上车削螺纹时往往需要若干次走刀才能完成。

操作　是指在一道工序中，工人所作的辅助性动作。如开车，进刀、退刀、停车、测量、装卸工件等。这些动作不记录在工艺规程中，仅用于确定时间定额。

把机械加工工艺过程细分之后，按一定的格式用图表和文字的形式固定下来，用来指导生产的技术文件，就是机械加工工艺规程。

在编制机械加工工艺规程时，要根据生产规模的大小来确定工艺过程的细分程度。对于小规模生产只需划分到工序，而对于大规模流水线连续生产，为了使每道工序的时间尽量相等，以实现有节奏地生产，这时往往要细分到每个操作，以严格控制每一工序的时间。

第二节　生产纲领与生产类型

一、生产纲领

机械制造厂每年应当生产的产品产量（即年产量）称为生产纲领。生产纲领对工厂的生产过程和生产组织起决定性作用。

制订工艺规程时，只知道工厂的生产纲领是不够的，还必须知道机械加工车间所要生产零件的生产纲领。某零件的生产纲领可按下式计算

$$N_L = N \cdot n \left(1+\frac{\alpha}{100}\right)\left(1+\frac{\beta}{100}\right)$$

式中　N_L——零件的生产纲领；

N——产品的生产纲领；

n——在每一产品中所包含该零件的数量；

α——该零件的备品百分率；

β——该零件的废品百分率。

二、生产类型

根据产品的大小、特征、生产纲领、批量以及投入生产的连续性，机械制造厂的生产可分为三种不同的生产类型，即单件生产、成批生产和大量生产。

1．单件生产　单个地或少量地制造不同结构和尺寸的产品，并且以后很少重复，甚至完全不重复的生产，称为单件生产。例如重型机械、大型船只、人造卫星等的制造以及产品试制车间、工装车间和机修车间的生产均属单件生产。

2．成批生产　一年中分批地制造相同的零件或产品，生产呈周期性的重复，这种生产称为成批生产。每批所制造的相同零件或产品的数量，称为批量。根据批量的大小，成批生产又可分为小批、中批和大批生产三种。例如机床、机车、重机枪、大口径机枪、火炮等的生产均属成批生产。

3．大量生产　当一种产品的制造数量很多，大多数工作地点经常在重复地进行一种工件的某一工序的加工，这种生产称为大量生产。例如汽车，自行车、缝纫机、自动步枪，冲

步枪等的生产均属大量生产。

生产类型不同，所反映出来的生产特点也不一样。不同的生产类型，其生产组织、生产管理、车间布置、毛坯、设备，工装、加工方法和工人的技术熟练程度等各方面的要求是不同的。因此，在设计工艺规程时应使其与生产类型相适应，只有这样，才能取得最好的经济效果。

产品（或零件）生产类型的划分，通常有两种方法：一种是根据工作地的专业化程度，另一种是根据产品产量的大小。前者又可分为两种方法：工序数目法（各工作地所承担的工序数目的多少，与之相应的类型及所占的比重）与大量系数法（每一个零件的每一道工序所需单件加工时间与该零件平均生产节拍之比），用它们来确定生产类型时，比较复杂，需要大量的统计和计算。为了简化计算，通常采用比较简单的产量法，即根据产品年产量的大小及某些特征（如质量）来确定生产类型，见表1-3。各种生产类型的特征表1-4。

表1-3 生产类型的划分

生产类型		同一产品的年产量（件）		
		重型机械❶	中型机械	小型机械
单件生产		<5	<10	<100
成批生产	小批生产	5～100	10～200	100～500
	中批生产	100～300	200～500	500～5000
	大批生产	300～1000	500～5000	5000～50000
大量生产		>1000	>5000	>50000

❶重型、中型和小型机械可分别以轧钢机、柴油机和缝纫机作为代表。重型、中型和小型零件通常是指质量>30kg、4～30kg和<4kg的零件。

表1-4 各种生产类型的特征

特征项目＼生产类型	单件生产	成批生产	大量生产
1.产品品种、数量及加工过程的重复性	产品品种多，数量很少，加工过程基本上不重复或很少重复	产品品种较多，数量多，加工过程周期性重复（成批地投产）	产品品种少，数量很多，每台机床经常用于一种零件的一个工序的加工（长期不断重复）
2.工件的互换性	一般是配对制造，没有互换性，广泛应用钳工修配	大部分有互换性，少数采用钳工修配	全部有互换性，某些精度较高的配合件用分组选择装配
3.毛坯的制造方法及加工余量	铸件用木模手工造型，锻件用自由锻；毛坯精度低，加工余量大	部分铸件用金属模，部分锻件用模锻；毛坯精度中等，加工余量中等	铸件广泛采用金属模机器造型，锻件广泛采用模锻以及其它高生产率的毛坯制造方法；毛坯精度高，加工余量小
4.机床设备、自动化程度及其布置	采用通用设备；自动化程度较低；按机床类型排列	使用通用的和部分专用设备；有部分自动化；按机床类型排列，但考虑产品流动方向	广泛采用专用和高生产率设备；自动化程度较高，广泛采用自动线；机床按加工过程流水线顺序排列
5.夹具	多用标准附件，极少采用专用夹具	广泛使用专用夹具	广泛使用高效能专用夹具
6.刀具与量具	采用通用刀具和万能量具	较多采用专用刀具及专用量具	广泛采用高生产率的专用刀具和专用量具

续表

生产类别 特征项目	单件生产	成批生产	大量生产
7.安装方法与尺寸获得方法	广泛采用划线找正安装；用试切法获得尺寸精度	广泛使用夹具安装，但仍有一部分划线找正；用调整法获得尺寸精度	一律采用夹具安装；用调整法和自动化加工获得尺寸精度
8.对工人技术水平的要求	要求较高，需要技术熟练的工人	对少数工人技术水平要求高，对大部分工人技术水平要求中等	对调整工的技术水平要求高，对操作工人的技术水平要求较低
9.工艺规程	很简单，只编制简单的过程卡片	较详细，编制详细的过程卡片，重要零件的工艺卡片、关键工序的工序卡片	编制详细的工艺规程，包括过程卡片、工艺卡片、工序卡片、调整卡片和检验卡片
10.生产率	低	中等	高
11.生产周期	长	中等	短
12.成本	高	中等	低
13.发展趋势	箱体类复杂零件采用加工中心加工	采用成组技术，用数控机床或柔性制造系统等进行加工	在计算机控制的自动化制造系统中加工，并可能实现在线故障诊断、自动报警和加工误差的自动补偿

第三节　自动武器制造的特点

自动武器是一种特殊机械，其生产与一般机械的生产既有许多共同之点，又有其独特之点。它的生产特点，归纳起来有以下两个方面：

一、生产组织方面的特点

1．按武器种类组织生产工厂

为了合理地利用设备，简化管理，提高劳动生产率，保证产品质量，自动武器的生产工厂通常是按武器的种类组建的。例如手枪厂、冲锋枪厂、自动步枪厂、机枪厂、大口径机枪厂、航空自动炮厂等。

2．生产计划严格，生产组织严密，生产情况保密

自动武器的生产取决于国防的需要和外贸的要求，故其生产计划是严格的，指令性的。为了保证武器的质量，按时地完成生产计划，其生产是“封闭”式的，产品的生产大都在一个工厂内完成，管理系统也是“封闭”式的，有严密的组织。

3．质量要求严格，层层进行质量把关

由于武器的使用性能要求高，因此，对武器的制造质量要求特别严格。工厂除树立“质量第一”的思想外，还有一个健全有效的质量保证体系，有一套严格的质量管理制度，并且工厂还驻有用户的代表（军代表），对武器的制造质量进行层层把关。

4．大量生产，流水作业

由于自动武器的需要量大，故其生产类型属于大批、大量生产。为了提高生产率，增加

经济性，适应产品转换和进行战备动员，其生产线一般为流水作业线。

5．军品生产与民品生产相结合

兵工厂的设计，通常是根据战争时期对武器的需求量来进行设计与组建的。在和平时期，对武器的需要量减小，此时，兵工厂有很大的剩余生产能力。为了挖掘兵工厂的生产潜力，为国家经济建设作出自己应有的贡献，在保证完成军品生产任务的同时，需要大力发展民品生产。军品、民品生产相结合，是历史的必然。

二、制造工艺方面的特点

1．制造零件用的材料普遍采用钢材，重要零件的材料均采用轻武器专用结构钢（YB 481—80）；毛坯广泛采用型锻件、型材和板料；枪身的大部分零件都要经过热处理（淬火与回火）

2．具有独特的深孔加工工艺

深孔加工比浅孔加工困难。一般所谓深孔，是指孔深L与孔径D之比等于或大于5的孔。在自动武器的枪管制造中，通常$L/D=20\sim50$，有的甚至达100以上。线膛中有多条膛线，弹膛中有多个锥体，它们的尺寸精度要求较高（IT9～11级），表面粗糙度要求较小（Ra 0.8～0.1），同轴度要求也较高。为了把枪管制造出来，需要有大量的特殊设备、工装、专门工艺和特殊工种的技术工人，这是一般民用产品生产中所没有的。

3．零件小，形状复杂，形面加工多，加工工序多

自动武器工作时，在每一自动循环中，需要完成很多动作。为了保证武器的机动性，要求武器体积小、质量小。这就使得武器零件形状复杂，形面多，外廓尺寸小。例如56式半自动步枪的机匣，用靠模铣削（用于形面加工）工序占整个工序数的38%。

由于武器零件的加工采用流水作业，所以加工工序比较多，通常可达50～100个。例如56式冲锋枪枪管有81个加工工序，56式半自动步枪机匣有124个加工工序。

4．切削加工量大，材料利用率低

武器零件的表面几乎都要进行机械加工。由于零件形状复杂，毛坯很难接近于零件的形状。零件的形状要通过所谓“剥皮挖心”，切除毛坯上大部分金属来达到，故切削加工量大。其材料利用率，对武器上一些主要零件来说，通常只在0.15～0.25之间。

5．工艺装备系数大

所谓工艺装备系数η，是指某种产品的全部专用工艺装备（专用的刀具、夹具、量具、模具、辅具和自动化装置等）的数量与该产品所包含的不重复零件的数量（除去外购件及标准件）之比，用公式表示为

$$\eta=\frac{\text{专用工艺装备总套数}}{\text{产品中不重复零件的总数}}$$

对于金属切削机床制造，η在0.4～1.5之间；对于火炮制造，η在40～50之间；对于自动武器制造，η可达50以上。

6．生产量大，而零件和部件没有完全采用完全互换

由于自动武器机构动作复杂，特征量比较多，以这些特征量为封闭环的尺寸链中所包含的零件及其尺寸较多。根据尺寸链原理，封闭环的精度一定时，组成环数愈多，每个环的制造公差便愈小，加工难度便愈大，制造费用增加。为了保证武器的装配精度，同时又不致提高制造成本，尽管武器的生产是大量生产，其装配仍然没有完全采用完全互换的原则，相当一

第二章 机械加工精度

第一节 概 述

一、加工精度的概念

产品及其零件的精度，包括设计精度和加工精度两个方面。前者是设计者根据产品性能要求对零件上各有关表面在尺寸、形状和位置等方面所提出的要求；后者是指加工后零件的实际几何参数与其理想几何参数相符合的程度。符合的程度越高，则加工精度也越高，而它们之间的不符合程度，即两者间的差异称为加工误差。

加工误差的大小反映了加工精度的高低，而加工精度的高低又是通过加工误差的大小表现出来，所以，加工精度和加工误差是评定零件几何参数准确程度这同一事物的两种不同提法。

零件的加工质量指的是零件的机械加工精度和表面质量。本章只讨论机械加工精度。

机械加工精度包括尺寸精度、形状精度和表面相互位置精度三方面。

尺寸精度是指加工后零件表面本身或表面与表面之间的实际尺寸与理想尺寸之间的符合程度，亦即指零件的上述表面在尺寸方面的精度要求。例如轴类和枪管等零件的直径尺寸，箱体和机匣等零件的长度、宽度、高度、孔径、孔中心距尺寸等方面的精度要求。

形状精度是指加工后零件表面的实际形状与理想形状之间的符合程度。比如对零件的圆度、圆柱度、直线度、平面度、线轮廓度、面轮廓度的要求。

位置精度是指加工后零件各表面之间的实际位置与理想位置之间的符合程度。比如零件相互表面之间的同轴度、平行度、垂直度、跳动等要求。

零件加工精度的上述三个方面，既有区别又有联系。没有一定的形状精度便谈不上尺寸精度和位置精度，所以互相要协调。通常三者之间的关系是：形状精度高于位置精度，而位置精度又高于尺寸精度。对于有配合要求的轴孔类零件，当需给出其形状公差时，一般按尺寸公差的1/4～2/3选取。

二、获得加工精度的方法

1．获得尺寸精度的方法

机械加工中，获得尺寸精度的方法主要有试切法、定尺寸刀具法、调整法和自动控制法。

（1）试切法 它是在零件的加工过程中，通过对零件的试切—测量—调整刀具—再试切的反复过程来保证尺寸精度的方法。这种方法的生产效率低，对工人的技术水平要求较高，通常用于单件、小批生产中。

（2）定尺寸刀具法 它是采用具有一定尺寸的刀具加工，以刀具的尺寸来保证被加工零件尺寸精度的一种方法。此法多用于封闭表面或对称表面的加工。例如用方形拉刀拉孔，用钻头、扩孔钻、铰刀或镗刀块加工内孔，以及用组合铣刀铣槽等。这种方法的生产率高，但

刀具的消耗量大。它在各类生产中均可采用，而且在自动武器制造中应用较多。

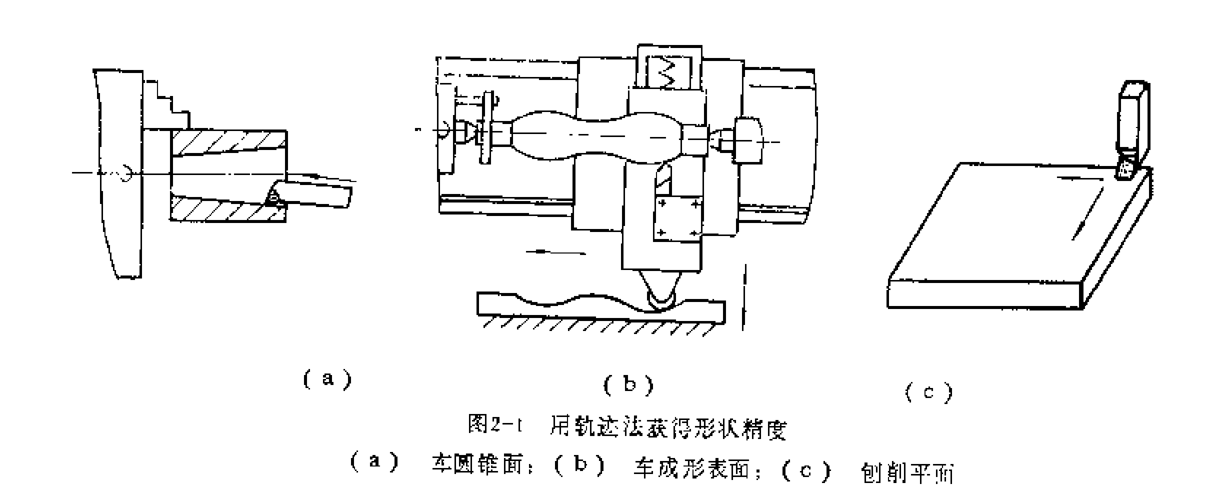
（3）调整法　也叫定距装刀法。它是按试切好的工件或标准样品或对刀块调整刀具相对工件加工表面的位置，来保证尺寸精度的方法。例如在六角车床、多刀半自动车床、自动车床上加工时，事先将刀具调整到一定位置，加工时无需试切，一次走刀即可完成复合工步，并获得多个加工表面的尺寸精度和它们之间的相互位置精度。在机床上用夹具安装加工时，一般也用调整法，这时刀具的位置是靠对刀块（铣床夹具）或导向套（钻模、镗模）来保证的。这种方法的生产效率高，对工人的技术水平要求较低，但调整费时，对调整工人技术水平要求较高。它适用于成批和大量生产，是自动武器制造中普遍采用的一种加工方法。

（4）自动控制法　它实际上是自动化了的试切法和调整法。这种方法是把测量、调整和切削等机构组成一个自动化系统，在工件加工完毕或加工过程中，自动测量装置测量工件的加工尺寸，与所要求的尺寸进行比较，将比较值通过转换或计算机计算后，输入到机床的调整执行系统，或使机床继续工作，或使机床进行自动调整，从而自动获得所要求的尺寸精度。例如，在无心磨床上磨削轴承环外圆时，通过测量装置控制导轮架进行微量的补偿进给，在数控机床上，通过数控装置、测量装置及伺服驱动机构，控制刀具在加工时应具有的准确位置，从而保证工件的尺寸精度。

2．获得形状精度的方法

工件的形状精度获得方式有下述三种：

（1）轨迹法　这种方法是依靠刀尖运动轨迹来获得所要求的表面几何形状。刀尖的运动轨迹取决于刀具和工件的相对运动(成形运动)。例如，通过工件回转和车刀的直线运动车削圆锥面〔图2-1(a)〕；通过工件的回转和车刀依靠模曲线运动车削成形表面〔图2-1(b)〕；用刨刀的直线运动和工件垂直于它所作的进给运动加工平面〔图2-1（c）〕等等。



（a）　（b）　（c）

图2-1　用轨迹法获得形状精度

（a）车圆锥面；（b）车成形表面；（c）刨削平面

（2）成形法　为了提高生产率，简化机床，常用成形刀具来代替通用刀具。此时，机床的某些成形运动就被成形刀具的刀刃几何形状所代替。例如在图2-2中，用成形车刀来加工回转曲面〔图2-2（a）〕；用车刀车削螺纹〔图2-2(b)〕，螺旋面由工件的回转运动和车刀的直线运动所产生，而螺纹的牙型则决定于车刀的形状，其牙型半角等于车刀的牙型半角。

（3）展成法　各种齿形的加工，常用此法。它是利用一对渐开线齿轮(或齿轮与齿条)

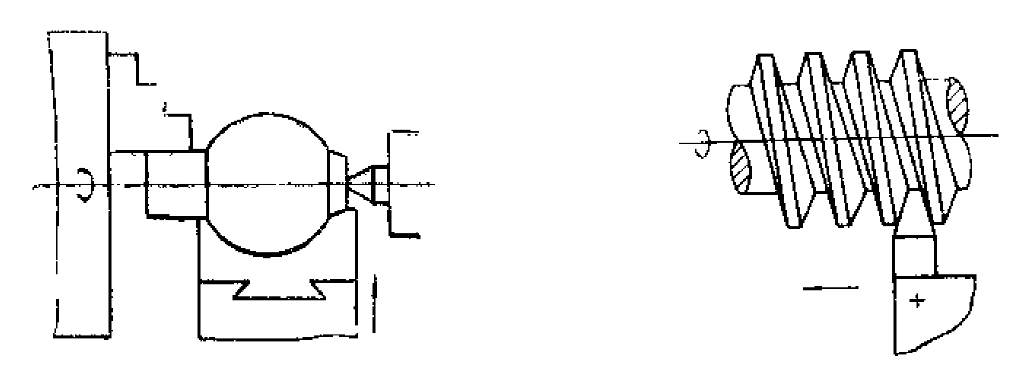


图2-2　用成形法获得工件形状

（a）成形车刀车削回转曲面；（b）车螺纹

无齿侧间隙啮合传动时，两轮齿廓互为包络线这一原理来加工齿轮的。图2-3为滚齿时的情况，滚刀与工件必须保持一定的速比关系，而工件的齿形表面是刀刃在相对啮合运动中的包络面。图2-3（a）为滚铣齿形；图2-3（b）为齿形包络线（面）。

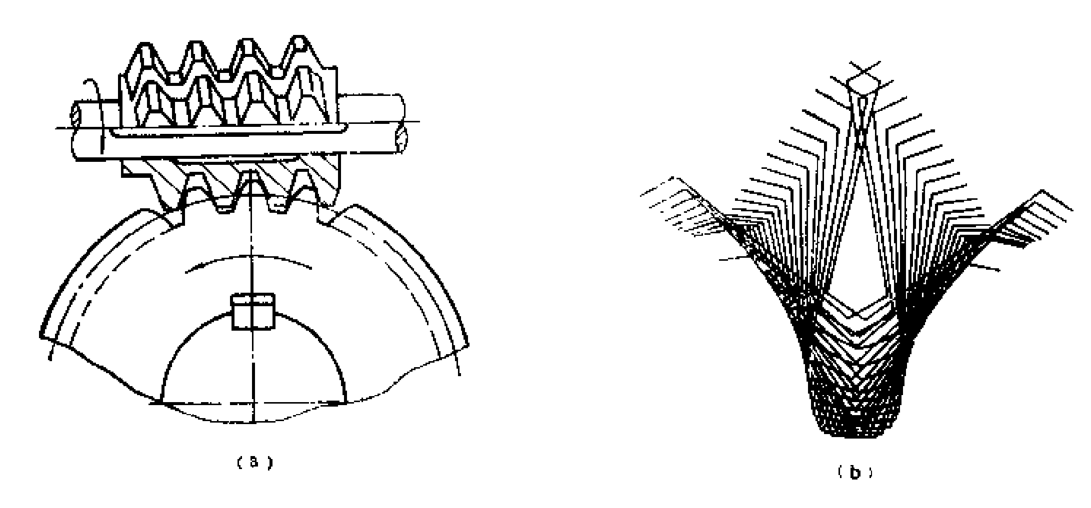


图2-3　用展成法获得工件形状

（a）　滚铣齿形；（b）　齿形包络线

3．获得位置精度的方法

（1）一次安装法　它是把要求保证相互位置精度的一组表面，在同一次安装中加工出来的一种方法。如图2-4（a）所示的套筒类零件，要求外圆A、E与孔B同轴，端面C与孔B垂直，就可以在一次安装中把它们加工出来。

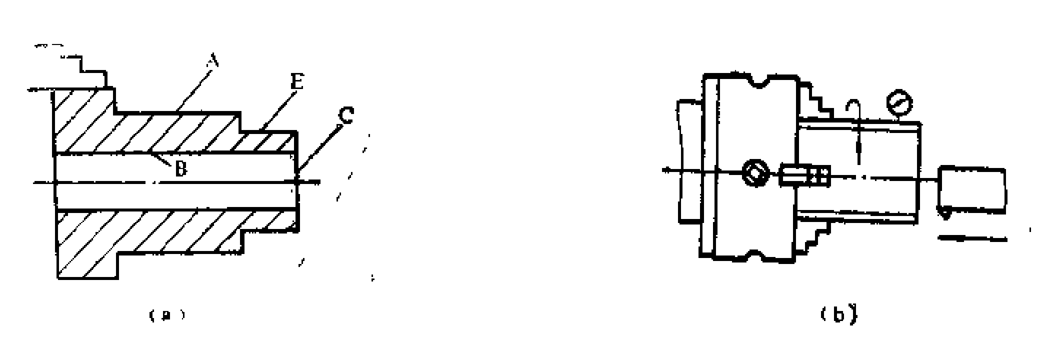


图2-4　获得位置精度的方法

（a）一次安装法；（b）直接找正法

（2）直接找正法　它是用工件已加工过的表面进行找正的方法加工。图2-4（b）为在车床上用四爪卡盘和百分表按已加工的外圆调整工件的位置，然后镗孔，便能保证与外圆的同轴度要求。

（3）夹具安装法　这种方法是通过夹具来确定工件与刀具的准确位置，从而保证相互位置精度的。详见《机床夹具设计》。

三、影响加工精度的因素

在机械加工中，由于加工精度的高低是用加工误差的大小表示的，所以，保证和提高加工精度的问题，实质上也就是限制与降低加工误差的问题。

零件的尺寸、形状和位置精度与由机床、夹具、刀具和工件所组成的工艺系统有关。工艺系统的种种误差，在不同的具体条件下，不同程度地反映为加工误差。这种工艺系统的误差称为原始误差。

工艺系统的原始误差包括两方面：一个为工艺系统本身的原始误差，如加工方法的原理误差，机床、夹具和量具的制造误差和磨损，刀具的制造误差，工件的安装误差和机床的调整误差。这些误差是加工前就存在的，其中机床、夹具和刀具的误差习惯上称为工艺系统静误差。另一个是在加工过程中由其它因素引起的误差，如工艺系统受力变形、受热变形引起的误差，刀具磨损以及工件内应力重新分布所引起的误差，前三者是加工中产生的，后一者可视为加工后出现的，通常称为工艺系统动误差。

度量方法、技术以及量具本身的制造误差所引起的误差叫做度量误差。它既存在于加工之前的调整，又存在于加工之初的试切和加工之后的测量中，可把它归入加工后出现的误差。工件或毛坯的制造误差，既反映在工件的安装误差中，又反映在工艺系统受力变形所引起的误差中。在研究与分析这两部分误差时，均要研究工件或毛坯的误差对它们的影响，因此，工件或毛坯的误差在这里不作为单独一项原始误差提出。

影响加工精度的因素，产生加工误差的原因，详见图2-5所示。

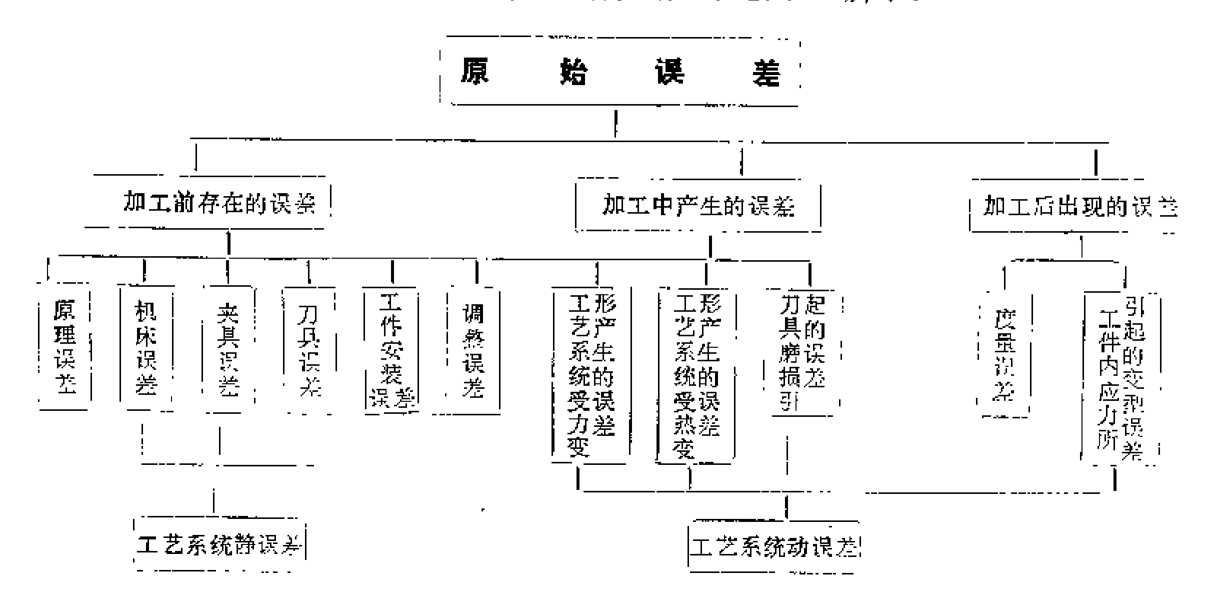


图2-5　产生加工误差的原始误差

四、研究加工精度的方法

研究与确定加工精度的方法，概括起来有以下三种：

1．分析计算法　这种方法就是详细地研究与分析加工过程中，可能产生的各原始误差，首先找出原始误差的变化规律或其具体数值，然后建立起原始误差与加工误差间对应的数学关系，并定量地计算出各原始误差所引起的加工误差的数值，最后把各原始误差所引起的加工误差按一定规律进行合成，从而便可求出总的加工误差的大小。这种方法进行起来比较复杂，应用较少。

2．统计分析法　这种方法是以对具体加工条件下所获得的工件进行实际测量所得到的资料为基础，应用数理统计方法对资料进行处理，从而确定在一定加工条件下误差的性质和加工误差的大小。这种方法只适用于大批、大量生产。

3．查表法　这是一种经验的方法。是按照"平均经济加工精度表"来确定加工精度。此法简单方便，但较粗糙，在编制工艺规程时经常采用，但要注意根据具体情况做适当调整。

第二节　影响机械加工精度因素的分析

一、加工原理误差

原理误差是由于采用了近似的成形运动或近似的刀刃轮廓所产生的误差。

在机械加工中，为了获得规定的加工表面，刀具和工件之间必须作相对的准确的成形运动。例如车削螺纹时，必须使刀具和工件间作准确的螺旋运动（成形运动）；滚切齿轮时，必须使滚刀和工件间有准确的展成运动。这种相对的准确的成形运动称为加工原理。当然也可以用成形刀具直接加工出成形表面。从理论上来讲应该采用理想的加工原理和完全准确的成形运动以获得精确的零件表面。但是，在某些情况下，按理论完全精确的成形运动或刀具形状，会使机床、刀具等结构极为复杂，造成制造上的困难；或者由于结构环节多，机床传动

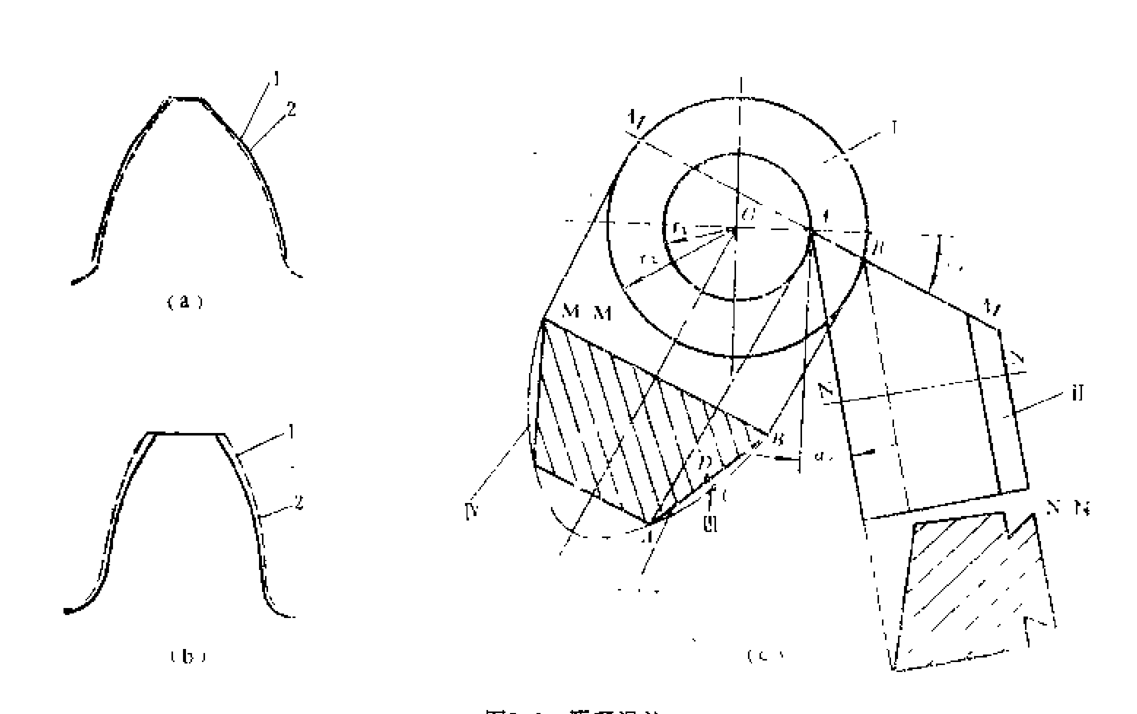


图2-6　原理误差

（a）滚齿；（b）铣齿；（c）用棱形车刀加工圆锥面

1—正确齿形；2—近似齿形；Ⅰ—工件；Ⅱ—棱形成形车刀；Ⅲ—切削刃应有的形状；Ⅳ—准确的工件形状；Ⅴ—直线切削刃切出的工件形状

中的误差增加，反而得不到高的加工精度。这时，若采用近似的加工原理，不仅可以简化机床或刀具的结构，而且能够提高生产率，使加工过程更为经济。因此，不能认为只要有了原理误差，这种加工原理就是不合理的。须知，在某些情况下采用近似方法要比精确方法更为合理。通常，当包含原理误差在内的加工误差的总和不超过图纸规定的精度要求（公差）时，或者近似方法理论上误差较小，小于1/7工件的公差值时，便可采用近似的加工方法。

用近似的加工原理，在实际生产中常可见到。现举数例如下：

用滚刀加工齿轮时，由于刀齿的数目是有限的，因而齿形的形成是断续的，故滚切出来的齿形不是正确的光滑连续的渐开线1〔见图2-6（a）〕，而是一条由若干短线段组成的折线2；用仿形法加工齿轮时，通常采用模数铣刀，理论上每种模数和每种齿数的齿轮都应用专门设计的铣刀加工，为了生产方便与经济起见，一般对于每种模数只用一套模数铣刀(由8～16把铣刀组成）来分别加工不同齿数的齿轮，因此齿形2就与理论齿形1有了偏差〔见图2-6（b）〕；用梳形圆柱形铣刀加工螺纹时，为了使切出来的螺纹直径一致，在调整机床时，铣刀的轴线应与工件的轴线平行，而不是相互成所切螺纹的螺旋角，因此，铣出来的螺纹形状就有误差；在车制模数蜗杆时，由于蜗杆的轴向齿距$p_x=\pi m$（m——蜗杆的轴向模数），而π为无理数，车床上的一套配换齿轮的齿数是有限的，在选择配换齿轮时只能将π化为近似的分数计算，故引起了齿距误差；用前角$\gamma_f>0°$的棱形成形车刀加工圆锥面时〔见图2-6（c)〕，为了得到正确的圆锥体，在前面上的刀刃必须做成内凹双曲线(如图中点划线A-C-B所示)，因为前面所在的平面M-M不通过工件轴线，即切削刃不在工件的轴向剖面内，M-M平面与圆锥面的交线为一外凸双曲线，因此，若要在工件上切出正确的圆锥面，便应使在M-M平面内的切削刃形状与此双曲线完全一致，即为内凹双曲线。但是在实际生产中为了制造简便起见，把切削刃在M-M平面内作成直线形〔如图2-6(c)中实线A-D-B所示〕，这样就使工件上被多切去一部分材料，反映在工件轴向表面内，其轮廓就不是直线形的圆锥面，而是内凹的双曲线回转面，从而形成了加工中的双曲线误差。

二、机床误差

机床误差包括机床本身的制造误差、磨损和安装误差。

机械加工一般是由机床来完成刀具相对工件的成形运动。机床的误差通过成形运动反映到加工表面上，形成加工误差。成形运动由回转运动与直线运动这两种基本运动所组成，通常有回转运动与直线运动、直线运动与直线运动、回转运动与回转运动等形式。机床的回转运动误差、直线运动误差、回转运动与直线运动间的位置误差以及在某些情况下要求这两种运动间恒定速比的误差(即传动误差)是机床影响零件加工精度的主要因素。现分析如下：

（一）直线运动误差

机床上移动部件的直线运动，主要是由机床上的导轨来实现的。导轨是一些移动部件的相对位置和运动的基准。机床床身导轨的制造误差、工作台与床身导轨之间的配合误差是影响直线运动精度的主要因素。导轨的各项误差将直接地反映到被加工表面的形状误差之中。对机床导轨的精度要求，主要有以下三方面：

1. 导轨在水平面内的直线度；
2. 导轨在垂直面内的直线度；
3. 两导轨的平行度(扭曲)。

现以车床为例，对导轨误差是怎样影响工件形状精度的情况说明如下：

当导轨在水平面内存在直线度误差(即导轨在水平面内有弯曲)时，在纵向切削过程中，刀尖运动轨迹相对于工件轴线就不能保持平行，若导轨向操作者一方凸出时，工件就产生鼓形(桶形)加工误差，反之，工件就产生鞍形(中凹)加工误差。若导轨在水平面内弯曲误差为Δy〔向操作者一方凸出，如图 2-7 (a)所示〕，这时，使刀尖由a点移动到e点，其移动量为Δy，从而使工件的半径增大，其增大量Δr等于Δy，直径增大量Δd等于$2\Delta y$。这就是说，导轨在水平面内的误差，将等量地反映到工件的半径上去，双倍地反映到工件的直径上去。

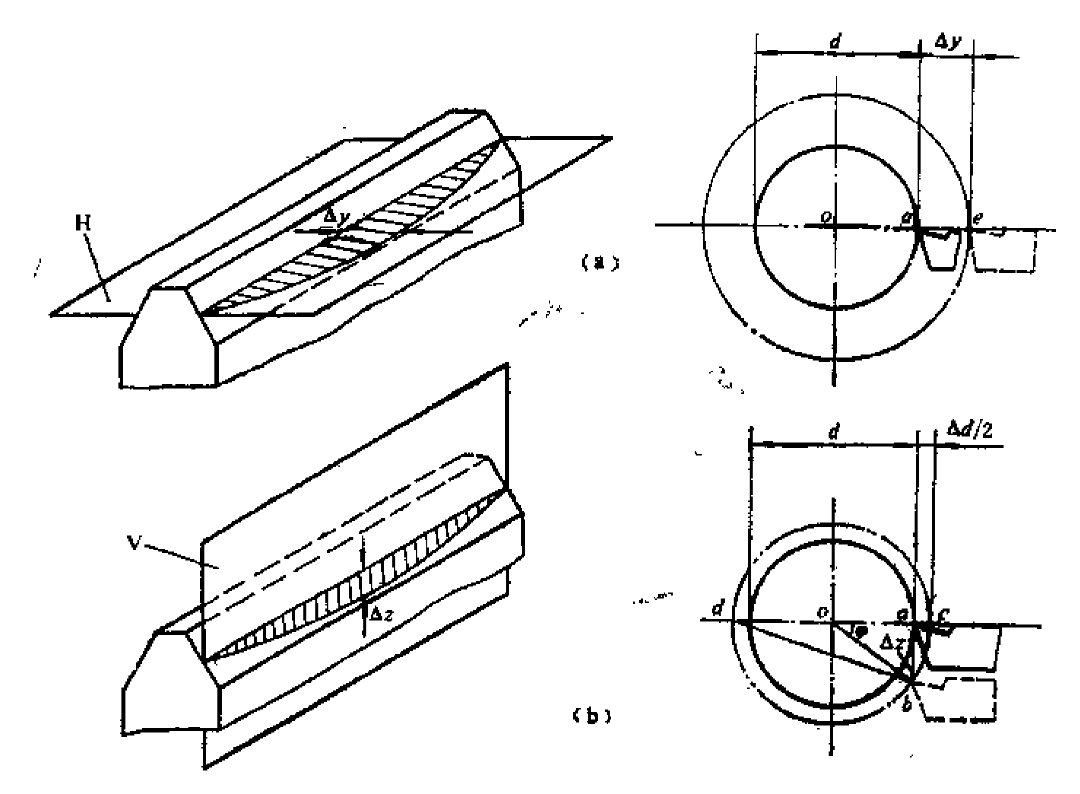


图2-7　导轨直线度误差对加工精度的影响
(a)水平面内；(b)垂直面内
H—水平面；V—垂直平面

当导轨在垂直面内存在有直线度误差时，会使刀尖在垂直面内上下移动，刀尖的运动轨迹不呈直线。设导轨的直线度误差使刀尖下移量为Δz，则对工件直径造成误差Δd可从图 2-7 (b)中求出

$$\Delta d=2\Delta z^2/d \tag{2-1}$$

例如车一光轴，其直径$d=40$mm，取$\Delta y=\Delta z=0.1$mm，则由Δy造成工件直径误差为

$$\Delta d=2\Delta y=0.2\text{mm}$$

由Δz造成工件直径误差为

$$\Delta d=2\Delta z^2/d=2\times0.1^2/40=0.0005\text{mm}$$

由此可见，导轨在水平面内的直线度误差对工件加工精度影响很大，而在垂直面内的直线度误差则影响很小，一般可忽略不计。这就是说，由导轨误差所引起的刀尖与工件之间的相对位移，如果在水平面内，即发生在加工表面的法线方向，则对工件的加工精度影响较大；如果在垂直面内，即产生在加工表面的切线方向，则对工件的加工精度的影响可忽略不计。所以，加工表面的法线方向称为误差敏感方向，加工表面的切线方向称为误差不敏感方向。

前后导轨的平行度误差，将使床鞍移动发生倾斜，刀架亦随之倾斜，在切削过程中，刀尖的成形运动轨迹变成一条空间曲线，使加工出来的工件产生圆柱度误差。在图2-8中，若车床三角形导轨相对于平导轨在任一截面内的平行度误差为δ，车床中心高为H，导轨宽度为B，则它引起的工件直径误差Δd为

$$\Delta d \approx 2\Delta y = 2H\delta/B \tag{2-2}$$

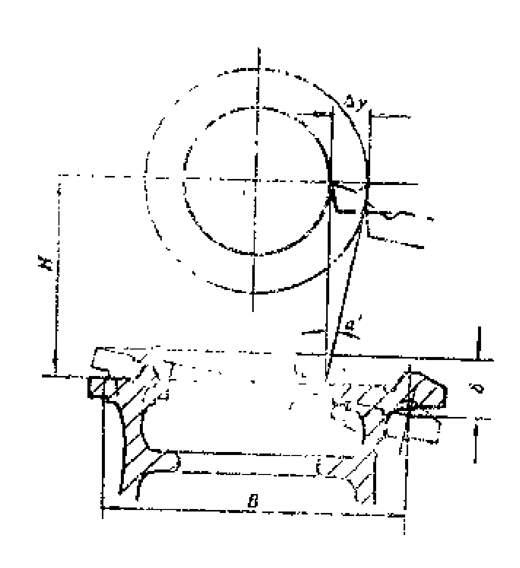


图2-8 导轨平行度误差（扭曲）对加工精度的影响

机床导轨的精度，不但决定于它的制造精度，而且与使用中的磨损以及机床的安装情况有很大关系。在车床上，因加工时切削力主要由前导轨承受，磨损较快，而且在导轨的长度方向上各段的使用频繁程度也不同，故各段的磨损程度也不一样。图2-9所示为某C620车床

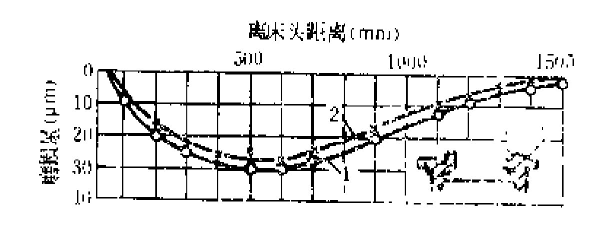


图2-9 C620车床前导轨磨损情况

在两班制的情况下使用9个半月后其前导轨的磨损情况。从图中可以看出，沿导轨纵向，磨损很不均匀。在离床头500mm处，磨损最大，可达30μm。这样大的垂直磨损必将影响导轨在水平面内的直线度及其扭曲，从而降低了加工精度。

导轨在垂直面内因磨损和安装误差引起工件的加工误差亦可用（2-2）式计算。

因此，对于精密及大型机床，不仅安装时，而且在使用期间需定期复核并修整导轨平直度。

（二）主轴的回转运动误差

机床主轴是工件或刀具的位置基准和运动基准，它的误差直接影响着工件的加工精度。对主轴的要求，归纳起来就是在运转情况下它能保持轴心线的位置稳定不变，即有高的回转

精度。主轴的回转精度不但与主轴的精度、轴承的精度和床头箱体主轴孔的精度以及装配有关，而且还和受力、受热后的变形以及磨损等有关。但是，主轴部件的制造精度是主轴回转精度的基础。

在主轴部件中，由于存在着主轴轴颈的圆度误差、轴颈间的同轴度误差、轴承本身的制造和装配误差、轴承之间的同轴度误差、主轴的挠度和支承端面对轴颈轴心线的垂直度误差等等，致使主轴的回转轴心线的空间位置，在每一瞬时都是变动的，也就是说，存在着回转误差。

主轴的回转误差可分解为三种基本型式（图2-10），即纯径向跳动、纯角度摆动和纯轴向窜动。

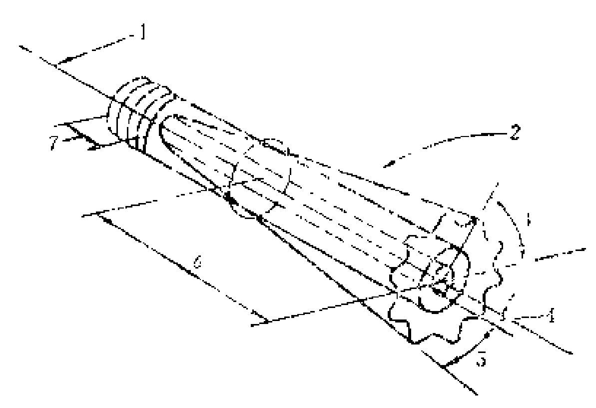


图2-10 主轴回转误差的基本型式

1—回转中心线；2—回转速度；3—回转位置；

4—纯径向跳动；5—纯角度摆动；6—支承距离；7—纯轴向窜动

机床主轴的回转误差直接影响零件加工表面的几何形状精度。主轴的回转误差对加工精度的影响，要从切削加工表面的每个截面内，主轴瞬时回转中心与刀尖的位置变化来分析。由于刀尖与被加工表面的法线方向为误差敏感方向，故在分析主轴回转误差对加工精度的影响时，应着重分析误差敏感方向上的影响。所以主轴回转误差定义为主轴回转时其瞬时回转轴线相对于理想（平均）回转轴线的偏移在误差敏感方向上的最大变动值。对于工件回转类机床，例如车床，由于刀具不回转，而是工件回转，故切削力的方向是不变的，误差敏感方向也是固定不变的；对于刀具回转类机床，例如镗床，由于刀具在回转，因此切削力的方向随刀具回转，误差敏感方向也在回转。

不同型式的主轴回转误差对加工精度的影响不同，同一型式的回转误差在不同的加工方法中对加工精度的影响也不一样。

主轴的纯径向跳动，主要影响圆柱面的形状精度，而对端面或端台的形状精度没有什么影响。在车削和镗削中，这一跳动对形状精度的影响，以在镗削中较为显著。

主轴的纯角度摆动，对被加工工件的圆柱表面和端面的形状均有影响。在车削时，由于车床主轴的纯角度摆动，得到的工件是一个锥体，而不是一个圆柱体；在镗床上镗孔时，由于主轴的纯角度摆动使得回转轴心线的平均位置O_{av}与工作台导轨不平行，即O_{av}与工件孔的轴线O不同轴，镗出的孔将是椭圆形的（图2-11）。

主轴的纯轴向窜动对内外圆加工没有影响，但在车床上加工端面时，则车出的端面与内外圆不垂直。主轴每转一周，就要沿轴向窜动一次，向前窜动的半周中形成右螺旋面，向后窜动的半周中形成左螺旋面，最后切出如同端面凸轮一样的形状，当加工螺纹时，必然会产生单个螺距内的周期误差（螺纹的螺旋线误差），如图2-12所示。

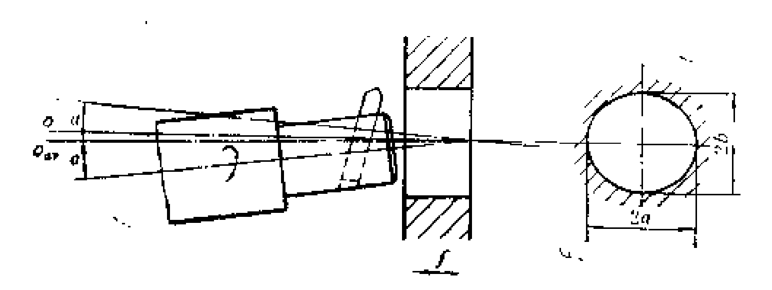


图2-11　主轴纯角度摆动对镗孔的影响

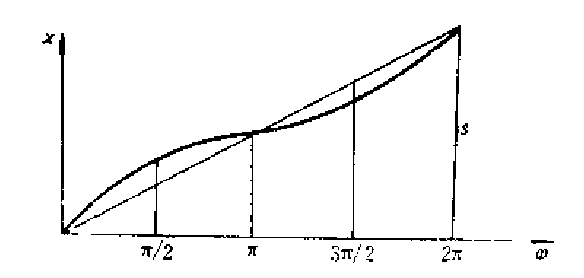


图2-12　主轴的纯轴向窜动引起的螺旋线误差

主轴的回转精度对加工精度的影响是显著的。为了提高主轴的回转精度，通常采用两种办法：其一是设计与制造高精度的主轴部件。获得高精度主轴部件的关键在于提高轴承精度。在滑动轴承方面，可采用静压轴承、短三瓦自动调位轴承；在滚动轴承方面，可采用精密滚动轴承并采取预加载荷以提高其工作刚度。对于滚动轴承，除了根据机床精度等级作相应的选择外，还应相应地确定轴颈、支承座孔、调整螺母等有关零件的精度以及轴颈与内圈、支承座孔与外圈的配合公差等要求。实践证明，只有当主轴、支承座孔以及有关零件都制造、装配得很精确时，高精度的轴承才能发挥作用，主轴才有可能获得很高的回转精度。其二是使回转精度不依赖于机床主轴，典型的例子是采用死顶尖磨削外圆和使用电磁无心磨夹具。这时，工件的成形回转运动不是由机床主轴的回转运动来实现，而是由工件的定位基准（如顶尖孔）或被加工面本身与夹具定位元件组成的回转运动副来实现。这样，机床主轴部件的误差就不再对工件的回转运动产生影响。图2-13所示为外圆磨削加工中采用死顶尖的情况，它只起定心作用，从而避免了头架主轴回转误差对工件加工精度的影响。

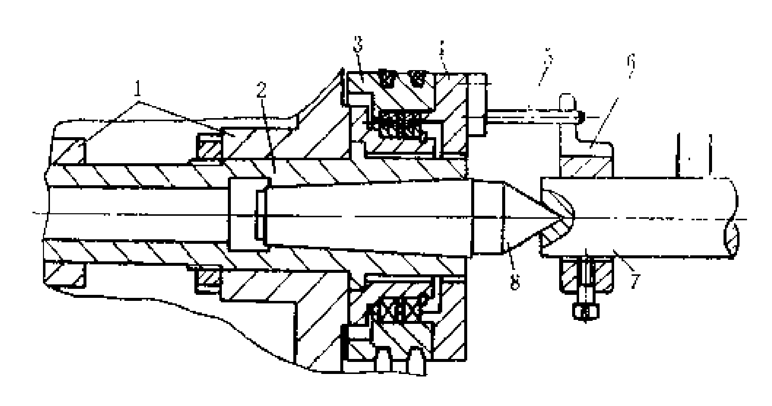


图2-13　外圆磨床头架主轴的结构

1—壳体；2—主轴；3—皮带轮；4—拨盘；5—拨杆；

6—夹头；7—工件；8—顶尖（不转）

5. 采用误差校正机构。这种方法的实质是人为地在传动链中加入一个与机床传动误差大小相等方向相反的误差，以抵消传动链本身的误差。

三、夹具误差

夹具的制造误差、定位元件和导向元件的磨损以及夹具在机床上的安装误差等所引起的误差称为夹具误差。详见《机床夹具设计》。

四、刀具的制造误差与磨损

由于刀具的种类繁多，各种刀具对加工精度的影响，随刀具的种类不同而不同，故需按类讲述。

1. 用定尺寸刀具加工 当用钻头、铰刀、丝锥、板牙、切槽车刀、键槽铣刀等定尺寸刀具加工时，刀具的尺寸直接决定工件的尺寸，所以加工表面的尺寸精度决定于刀具的制造精度。

2. 用成型刀具加工 这类刀具如成型车刀、成型铣刀、成型砂轮等，它们的形状直接决定了工件被加工表面的形状，故被加工表面的几何形状精度决定于刀刃形状的制造精度。

3. 用齿轮滚刀、插齿刀、花键滚刀等加工 由于这些刀具是按展成法原理设计的，故其刃口的几何形状与有关尺寸，都会直接影响工件的加工精度。

4. 用一般刀具加工 例如用普通车刀、镗刀、平面铣刀、砂轮等加工外圆、平面和内孔时，加工尺寸的精度常靠调整法来保证，故刀具的制造精度对加工精度基本上没有影响。

但是，不管用什么样的刀具，它们在切削过程中都不可避免地要产生磨损。刀具的磨损不仅会引起刀具尺寸变化面使被加工工件尺寸改变，并且由于切削刃变钝而使切削力增大，引起工艺系统弹性变形增大，使工件尺寸产生额外的变化。因此，刀具的磨损是影响加工精度的一个重要方面。

刀尖在误差敏感方向的磨损通常称为刀具的尺寸磨损。

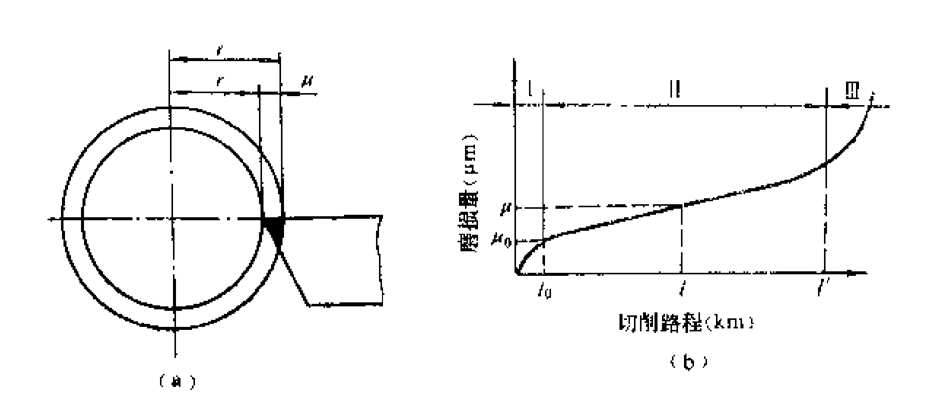


图2-15 刀具磨损对加工尺寸的影响及刀具磨损量与切削路程的关系
(a)刀具磨损对加工尺寸的影响；(b)刀具磨损量与切削路程的关系

在图2-15(a)中，若刀具的尺寸磨损量为μ时，调整尺寸r将变为r'，工件直径从$2r$变为$2r'$，直径增加量2μ。图2-15(b)所示为刀具尺寸磨损量μ与切削路程l的关系，从中可以看出，刀具的磨损可分为三个阶段：第Ⅰ阶段为初始磨损阶段，刀具的磨损较快，时间约几分钟，切削路程l_0不超过1000m，初期磨损量以μ_0表示。第Ⅱ阶段为磨损量与切削路程成正比(直线关系)的阶段，常称为正常磨损阶段。直线的斜率为K_μ，称为单位磨损，它的单位为

每切削1000m路程时刀具尺寸磨损所增加的量，以μm计。这一阶段的切削路程l'可达30000m。刀具在磨损变钝以前，绝大部分工作是在这个阶段进行的。第Ⅲ阶段为急剧磨损阶段。当切削路程超过l'时，由于切削条件改变大，如摩擦增加、温度升高，切削力增大等原因，所以磨损又开始加速，这时应停止切削，进行刀具刃磨，否则，刀具会迅速烧坏或崩坏。

当刀具切削路程为lm时，刀具的磨损量μ可按下式计算

$$\mu=\mu_0+\frac{K_\mu(l-l_0)}{1000}\approx\mu_0+\frac{K_\mu l}{1000}(\mu m) \tag{2-3}$$

式中，μ_0、K_μ之值可查有关工艺手册。

对于车削，l值的计算为

$$l=vT \qquad 或 l=\frac{\pi d}{1000}\cdot\frac{l_1}{f}\ (m)$$

式中 v——切削速度，m/min；

T——切削时间，min；

d、l_1——分别为被加工表面的直径和长度，mm；

f——进给量，mm/r。

用车刀车削轴类零件时，刀具的磨损会使工件产生锥度，在加工长轴时更为明显。在用调整法车削小轴时，车刀的磨损会使一批工件的尺寸逐渐增大，因而使整批工件的尺寸分散范围增大。

精细车削、精细镗孔时，由于所用的进给量很小，刀具的磨损对工件精度的影响很大。

磨削时砂轮的耗损，一般比车刀刀尖的磨损大得多。对于一般外圆磨削来说，由于砂轮尺寸比较大，纵向进给速度快，因此尽管砂轮磨耗比刀具磨损要大得多，但它对工件的精度影响很小，可忽略不计。但是在内圆磨削时，砂轮尺寸比较小，砂轮的损耗显著地影响砂轮的尺寸和形状，因而一般在精磨前都要重新修整一次砂轮，且不能用调整法定距对刀获得工件最后尺寸。

为了减少刀具制造误差和磨损对加工精度的影响，除应合理规定刀具的制造误差外，还应根据工件材料和加工要求，正确选择刀具材料、切削用量、冷却润滑液，并及时、准确地刃磨刀具。

五、工件安装误差

工件安装误差是指工件在机床或夹具上定位和夹紧时产生的误差。这些误差的分析计算，详见《机床夹具设计》。

六、调整误差

零件加工的每一个工序中，为了获得被加工表面的加工精度，需要将刀具切削刃与工件被加工表面的相对位置预先调整好。其工作内容包括：在机床上安装夹具；按要求精度调整加工尺寸，即调整刀具相对于工件定位基准或机床、夹具上的定位面的距离；在固定刀具和夹具的位置以后，试切工件，检查调整精度，必要时进行补充调整，直到调整合格为止。这些调整工作引起的误差称为调整误差。

由于零件的产量及其精度要求的不同，所用的调整方法也不一样。在大量生产中，一般采用样板、样件、挡块及靠模等调整工艺系统；在小批生产中，则多用试切法调整。被加工表面的复杂程度不同，调整工作的繁简亦随之而异。对简单表面（如内、外圆柱面），一般

只需调整成形运动的位置关系；对复杂表面（如螺旋面、渐开面），则还要调整成形运动的速度关系。

在实际切削以前，调整刀具的切削刃相对于夹具定位元件支承面的距离，使之达到规定的尺寸，这种尺寸调整叫做静调整。静调整得不到最佳的调整位置。只有在静调整的基础上，通过实际切削，在考虑加工过程的动态因素影响之后，进行补充调整，才能使加工出来的工件尺寸既不超差，又能使调整周期保持最长，这种调整称为动态调整。

各种调整方法及其误差的来源如下：

（一）用试切法调整

用试切法调整，就是对被加工零件进行试切—测量—调整—再试切，直至达到所要求的精度。它的调整误差来源有：

1. 度量误差　包括量具的制造误差、读数估计误差、测量温度和测量力等掺入到测量所得的读数中所引起的误差，无形中扩大了加工误差。

2. 微进给机构灵敏度所引起的误差　在试切中，总是要微量调整刀具的进给量，以便最后达到零件的制造精度。但是，由于微量进给机构中常出现“爬行”现象，结果使刀具的实际进给量比手轮转动的刻度值总要偏大或偏小些，以致难于控制尺寸精度，造成加工误差。

3. 最小切削厚度极限的影响　在切削加工中，刀具所能切掉的最小切削厚度是有一定限度的。锐利的刀刃可切下5μm，已钝的刀刃只能切下20～50μm，切削厚度再小时刀刃就切不下金属而打滑，只起挤压作用。精加工时试切的金属总是很薄的，由于打滑和挤压，试切的金属实际上可能没有切下来，这时如果认为试切尺寸已合格，就合上纵走刀机构切削下去，则新切到的部分其切削深度将比已试切的部分要大，因此最后所得到的工件尺寸会比试切部分小些。

（二）用定程机构调整

在半自动机床、自动机床和自动线上，广泛应用行程挡块、靠模及凸轮等机构来保证加工精度。这些机构的制造精度和刚度，以及与其配合使用的离合器、控制阀等的灵敏度就成了影响调整误差的主要因素。

（三）用样件或样板调整

在各种仿形机床、多刀机床和专用机床加工中，常采用专门的样件或样板来调整刀具与刀具、刀具与工件之间的相对位置，以此来保证零件的加工精度。在这种情况下，样件或样板本身的制造误差、安装误差和对刀误差就成了影响调整误差的主要因素。

刀具或砂轮位置经准确调整后，由于加工过程中的磨损，会使零件超差，故需要重新调整。为了使每次调整前加工的零件数目尽可能多，则开始加工的零件尺寸应接近工作量规的止端（对外表面来说是公差的下限，即调整尺寸应根据工件的最小加工尺寸来确定，为了不产生废品，此时应保证调整误差只产生于使工件尺寸增大的一面）。这一点与单件小批生产时所用的试切法不同，后者为了避免产生不可修复的废品，常将尺寸调整在接近工作量规过端的一边。

调整误差可根据有关表格提供的数据算出，也可以按被加工尺寸公差值的1/10来计算。

对于自动化程度高的机床，可采用光测、电测仪器以提高调整精度。例如在精密磨床上采用主动测量装置，就可以消除调整误差。在坐标镗床、数控机床上广泛应用光学读数头、

光栅、感应同步器等检测装置，利用这些装置的调整精度可达到μm级。

七、工艺系统受力变形所引起的误差

（一） 工艺系统的刚度

由机床、夹具、刀具和工件所构成的工艺系统，是一个弹性系统。它在切削力、传动力、惯性力、夹紧力以及重力等的作用下，将产生相应的变形和振动。这种变形和振动，将破坏刀具与工件之间成形运动的位置关系和速度关系，还影响切削运动的稳定性，从而造成各种加工误差并使表面粗糙度恶化。

工艺系统的变形包括工艺系统各组成环节本身的弹性变形以及各组成环节配合处的位移。工艺系统弹性变形的数值，除了取决于作用力的大小外，还取决于工艺系统抵抗作用力的能力。广义而言，在力的作用下，工艺系统抵抗在作用力方向上产生变形的能力称为工艺系统的刚度。

刚度的计算公式为

$$k_{xt}=\frac{F_y}{y}\ (\mathrm{N/mm}) \tag{2-4}$$

式中 k_{xt}——工艺系统的刚度；

F_y——垂直于工件被加工表面方向（即y方向）上的切削分力（N）；

y——由总切削力引起工件被加工表面在y方向上的相对位移（mm）。

如果引起工艺系统弹性变形的作用力是静态力，则由此力和变形关系所决定的刚度为静刚度；如果作用力是交变力，系统便会产生振动，其振幅和频率与激振力的振幅和频率有关，通常把在某一频率范围内产生单位振幅所需的激振力幅值称为系统在该频率下的动刚度。工艺系统的动刚度，主要影响工艺系统的振动，影响工件的表面质量。由于篇幅所限，下面仅研究静刚度。

（二） 工艺系统的刚度分析

工艺系统的刚度是由组成系统的各个部分的刚度决定的，下面逐一进行研究。

1．工件和刀具的刚度

工件和刀具有相类似的情况。例如，在车床上用卡盘安装工件进行车削时，工件是悬臂梁，而用两顶尖安装工件进行车削时，工件为简支梁；在镗床上用悬伸式镗杆进行镗削时，镗杆是悬臂梁，而用双支点镗杆镗削时，镗杆为简支梁。悬臂梁、简支梁的受力变形（挠度）y可由材料力学中公式求出。

悬臂梁的刚度（以工件为例）

由于 $$y_{w_1}=\frac{F_yL^3}{3EI}$$

则 $$k_{w_1}=\frac{3EI}{L^3}$$

简支梁的刚度（以工件为例）

由于 $$y_{w_2}=\frac{F_yL^3}{48EI}$$

则 $$k_{w_2}=\frac{48EI}{L^3}$$

式中　L——工件长度（mm）；

E——材料的弹性模数（N/mm^2）；

I——工件断面的惯性矩（mm^4）；

y_{w_1}——外力作用在梁（工件）端点的最大位移（mm）；

y_{w_2}——外力作用在梁（工件）中点的最大位移（mm）。

2．接触刚度

由于机床和夹具是由许多零、部件组成，故其受力与变形之间的关系比较复杂，尤其是零件与零件的接触刚度和部件刚度很难用公式表达。例如，如图2-16所示为一块经过刨削加工且边长为10mm的方铁，在外力F（=48N）的作用下，按材料力学中的公式计算出方铁的变形量$y_j=0.04\mu m$，而实际测得的变形量$y_o=1\mu m$。可见，y_c与y_j相差24倍。为什么会有这样大的差别呢？其主要原因是由于接触变形的影响。从理论上来讲，加48N的力后，应在方铁$100mm^2$的底面上均匀分布，但实际上两个接触面都不可能加工得很平，因面只有少数一些点(凸峰)在接触，在这些接触点处产生了较大的接触应力，因而产生了很大的接触变形。

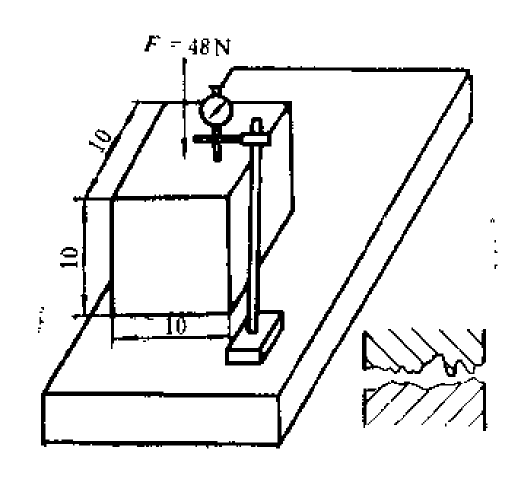


图2-16　接触变形实验

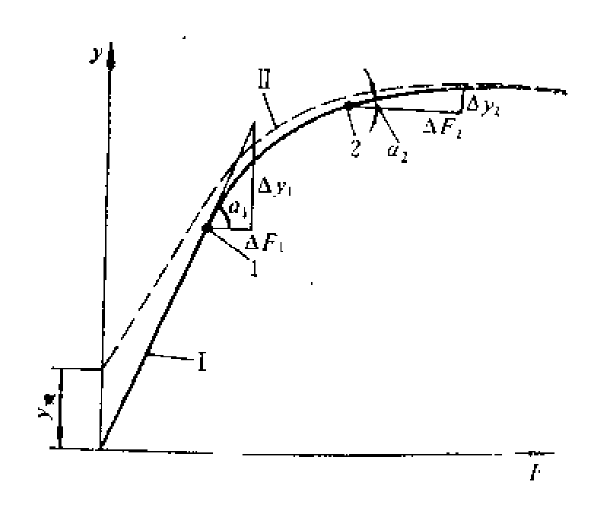


图2-17　接触变形的规律

Ⅰ—加载；　Ⅱ—卸载

通过实验发现：接触变形与加工方法（表面粗糙度）有关；接触刚度不是一个常数，即其变形量与外力之间不是线性关系，如图2-17所示。从图中可以看出，外力越大其接触刚度越大，如曲线上2点的刚度$k_2=\Delta F_2/\Delta y_2=\mathrm{ctg}\alpha_2$大于1点的刚度$k_1=\Delta F_1/\Delta y_1=\mathrm{ctg}\alpha_1$。

接触刚度不是常数的原因，主要是当外力不断增加时实际接触面积的增加速度大于外力的增加速度。另外，当在加载过程中，接触面局部要产生塑性变形，而在卸载时，一般不按原来的关系曲线恢复，产生相应的残余变形。

影响接触刚度的因素，概括起来有两方面：

（1） 工件表面的几何形状误差和表面粗糙度　机械加工后的零件表面总是存在着宏观的几何形状误差和微观的表面粗糙度，所以零件间的实际接触面积只是名义接触面的一小部分，真正处于接触状态的，仅仅是这一小部分的个别凸峰。施加外力时，在这些接触点处产生较大的接触应力，引起接触变形。接触变形中不仅有表面层的弹性变形，而且有局部塑性变形，这就是零件接触刚度低的主要原因。

（2） 工件材料的种类与硬度的高低　当表面粗糙度一定时，接触刚度与材料有密切的关系，例如铸铁与塑料的接触变形比铸铁与铸铁的接触变形大；当材料的硬度增加时，其屈服极限增加，因而减少了塑性变形，增加了接触刚度。

3．机床部件刚度

（1） 机床部件刚度的特征

机床部件在外力的作用下所产生的变形是由该部件中有关零件本身的变形和它们之间的各接触处的接触变形所构成。其中各接触处的接触变形的总量在部件变形中占很大比重，因此，对机床部件来说，外力与变形之间的关系也是一种非线性函数的关系。

图2-18（a）所示为机床部件的受力变形过程。从图中可以看出，首先是消除各有关配合零件之间的间隙，挤掉其间的油膜层的变形，接着是部件中薄弱零件的变形，最后才是

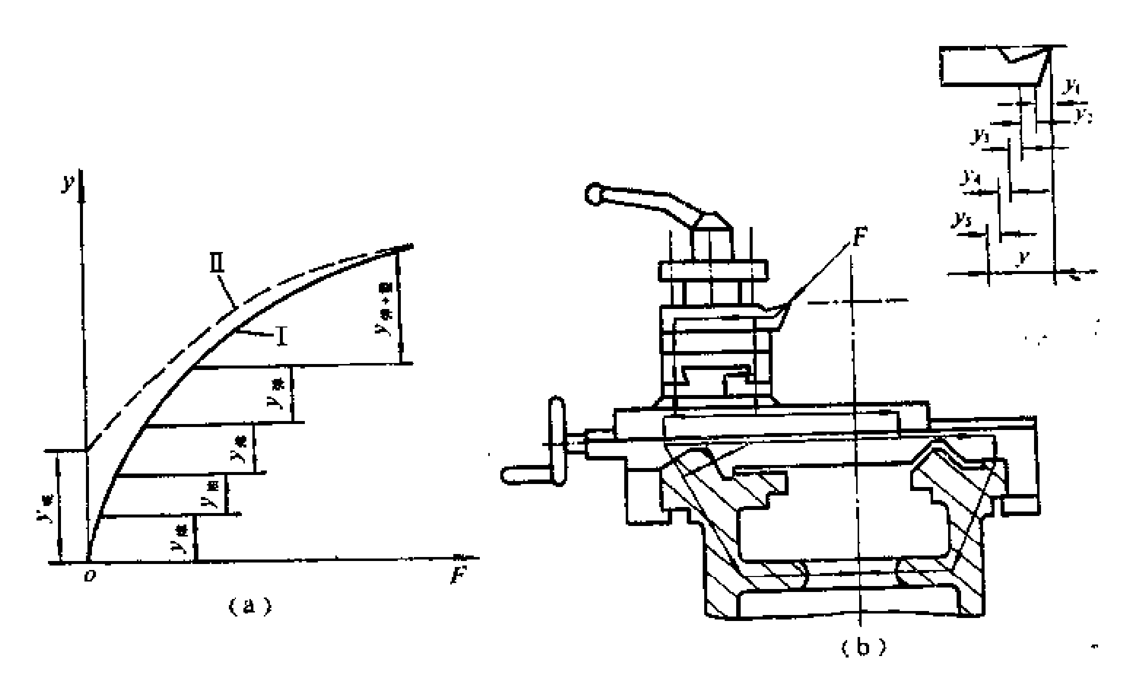


图2-18　部件受力变形过程及其受力变形与各组成零件受力变形间的关系

（a）机床部件受力变形过程；（b）刀架部件力的传递和环节位移的迭加

Ⅰ—加载；Ⅱ—卸载

其它组成零件本身的弹性变形和相应接触面的弹性变形及其局部塑性变形。力与变形是非直线关系。撤去外力时，卸载曲线Ⅱ与加载曲线Ⅰ不重合，变形不能恢复到起点，最后尚留有一定程度的残余变形。两曲线之间所包容的面积代表了在加载卸载的循环中所损失的能量，亦即消耗在克服零件间的摩擦力和接触面塑性变形所作的功。

图2-18（b）所示为车床的刀架部件，切削力从刀刃传到方刀架，经小刀架、中刀架、下刀架和床鞍，最后在床身上完成了封闭。这时，在切削力的作用下，刀刃相对床身的总位移量y是方刀架相对于小刀架的位移y_1、小刀架相对于中刀架的位移y_2、中刀架相对于下刀架的位移y_3、下刀架相对于床鞍的位移y_4以及床鞍相对于床身的位移y_5迭加的结果。

（2） 影响机床部件刚度的因素

机床部件刚度除与其组成的零件结构尺寸有关外，还与它们的加工质量和装配质量密切有关。影响机床部件刚度的主要因素，归纳起来有以下四个方面：

（i） 部件中各组成零件本身的刚度 一般说来，零件刚度的好坏是构成部件刚度好坏的基础，零件刚度不好，就会使部件刚度大大降低。例如在部件中存在有刚度比较低的薄弱零件时，受力后它的变形很大，这就使部件刚度严重恶化。图2-19所示为刀架部件中的楔铁（镶条），由于其结构细长刚性差，又不易加工平直，使用时接触不良，在外力作用下最易变形，使刀架的刚度大大降低。

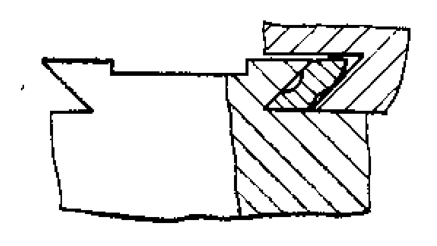


图2-19 楔铁的变形

（ii） 接触刚度 部件中各零件间的接触表面，在受力后其变形的数值，相对地比较大，所以部件的实际刚度远比想像的要小，这说明接触刚度是影响部件刚度的一个主要因素。

（iii） 零件间的配合间隙 零件接触面之间的间隙，对在加工中切削力方向经常变化的镗床和铣床来说，可视为接触变形的一部分，影响了接触刚度。如图2-20所示，当切削力方向改变时，间隙引起的位移，影响了刀具与零件加工表面间的准确位置，即影响了零件的加

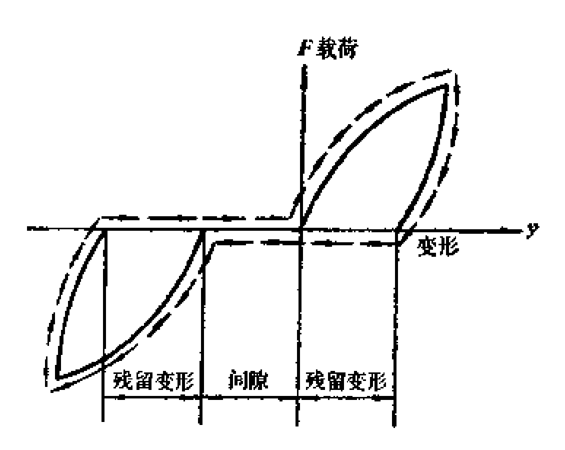


图2-20 间隙对刚度曲线的影响

工精度。对于单向受力，使工件始终靠向一边的加工，其间隙的影响较小。

（iv） 零件接触表面间的摩擦阻力 摩擦阻力对部件刚度的影响表现在：加载时，接触表面间的摩擦力阻止变形的增加；卸载时摩擦力又阻止变形的恢复。在刚度曲线中，加载与卸载曲线不重合，摩擦阻力是其主要原因之一。由于摩擦力影响了变形，影响了刚度，从而便影响了加工精度。

（3） 机床部件刚度的测定

由于机床部件刚度的复杂性，用分析计算法确定其对加工精度的影响，目前还比较困难，所以一般采用实验方法加以测定。测定的方法有三种：

（i） 单向静载荷法 这种方法是在机床处于静止状态，模拟切削过程中起决定性作用的力，对机床部件施加静载荷并测量其变形，然后通过计算求出机床的静刚度。图2-21所示，在车床顶尖间装一根刚性很大的心轴3，在刀架上装一个螺旋加力器9，其间装上测力环5，当转动加力螺钉8时，刀架6与轴3之间便产生作用力，力的大小由测力环中的千分表4读出。作用力一方面传到车床的刀架上，另一方面经过心轴3传到车床前后顶尖上。若加力器位于轴的中点，则床头和床尾各受到1/2的作用力，而刀架却受到整个作用力的作用。床头、床尾和刀架的变形可分别从千分表1、2和7读出，有了力和变形的数值，便可以算出机床的静刚度。这种方法结构简单，但与机床加工时的受力情况出入较大，故一般只能用于比较机床部件刚度的高低。

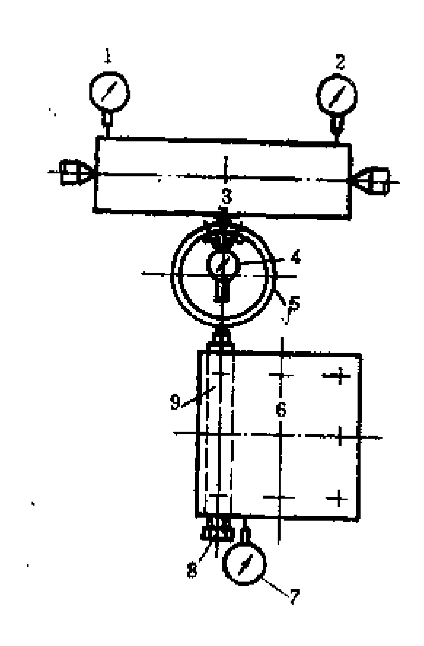


图2-21 单向静载测定法

1、2、4、7—千分表；3—心轴；5—测力环；6—刀架；8—加力螺钉；9—加力器

（ii） 三向静载测定法 为了克服前一种方法的缺点，测定时模拟实际切削时F_x、F_y与F_z的比值，从三个力的合力方向进行加载，这样测定的部件刚度比较接近加工实际。

（iii） 生产测定法 以车削为例，就是直接车削高刚度的阶梯轴的方法，利用车削前的已知条件和车削后的实测结果，按误差复映规律(后面将要研究)，即可求出机床的刚度。由于这种方法是在切削条件下进行的，因此它比较合乎实际情况。

4， 夹具的刚度

夹具的刚度和机床部件的刚度一样比较复杂，目前还只能通过实验的方法对它进行测定。

5．工艺系统刚度的表达式

切削加工时，机床的有关部件、夹具、刀具和工件在切削力的作用下，都要产生不同程度的变形，导致刀刃与加工表面在法线方向上的相对位置发生变化，从而便产生了加工误差。工艺系统在受力情况下产生的变形y_{xt}，是各组成部分的变形y_{jc}、y_{jj}、y_{dj}和y_w的迭加，即

$$y_{xt}=y_{jc}+y_{jj}+y_{dj}+y_w$$

而

$$k_{xt}=\frac{F_y}{y_{xt}},\quad k_{jc}=\frac{F_y}{y_{jc}},\quad k_{jj}=\frac{F_y}{y_{jj}},$$

$$k_{dj}=\frac{F_y}{y_{dj}},\quad k_w=\frac{F_y}{y_w}$$

式中 y_{xt}——工艺系统总的变形量，（mm）；

y_{jc}、y_{jj}、y_{dj}、y_w——分别为机床、夹具、刀具、工件的变形量，（mm）；

k_{xt}——工艺系统的刚度，（N/mm）；

k_{jc}、k_{jj}、k_{dj}、k_w——分别为机床、夹具、刀具、工件的刚度，（N/mm）。

所以工艺系统刚度的一般表达式为

$$k_{xt}=\frac{F_y}{y_{xt}}=\frac{1}{\frac{1}{k_{jc}}+\frac{1}{k_{jj}}+\frac{1}{k_{dj}}+\frac{1}{k_w}} \tag{2-5}$$

应用式（2-5）求解加工中某一系统的刚度时，应针对加工的具体情况，进行分析，抓住主要影响因素，忽略次要因素。如外圆车削时，车刀本身在切削力作用下的变形，对加工误差的影响很小，这时在工艺系统刚度的计算式中就可省掉刀具刚度一项；而在用普通钻头钻深孔时，由于钻头刚度不足，往往使加工出来的孔的轴心线发生弯曲和偏离，影响加工精度，这时在计算工艺系统的刚度时，刀具的刚度便不能忽略。又如在镗孔时，镗杆的受力变形严重地影响着加工精度，而工件（箱体零件）的刚度一般较大，其受力变形很小，故在计算工艺系统刚度时，可忽略工件对系统刚度的影响。

（三） 工艺系统受力变形所引起的加工误差

工艺系统受力变形，与作用力成正比，与工艺系统刚度成反比。系统刚度和作用力的大小及其变化，均影响工艺系统的变形，从而引起加工误差，影响加工精度。具体说有下面三种形式：

1．由于切削力着力点位置的变化而产生的工件形状误差

工艺系统的刚度除受各组成部分的刚度影响外，还随切削力着力点位置的变化而变化。现举例如下：

（1） 在车床两顶尖间加工光轴〔图2-22（a）〕 先假定工件短而粗，即刚度很大，它在切削力作用下的变形比机床的变形小到可以忽略不计，同时假定车刀悬伸很短，受力下的弯曲变形在被加工表面的法向上的分量小到也可以忽略不计，于是工艺系统的变形完全取决于机床头架（含顶尖）、尾座（含顶尖）和刀架的变形。再假定工件的加工余量很均匀，并且随机床变形而造成的切削深度变化对切削力的影响也很小，也就是说，车刀在进给过程中切削力保持不变。在上述假定的条件下，简化为求机床刚度与切削力着力点位置变化间的

关系，并通过机床刚度，即可以求出切削力着力点的位置变化对加工精度的影响。

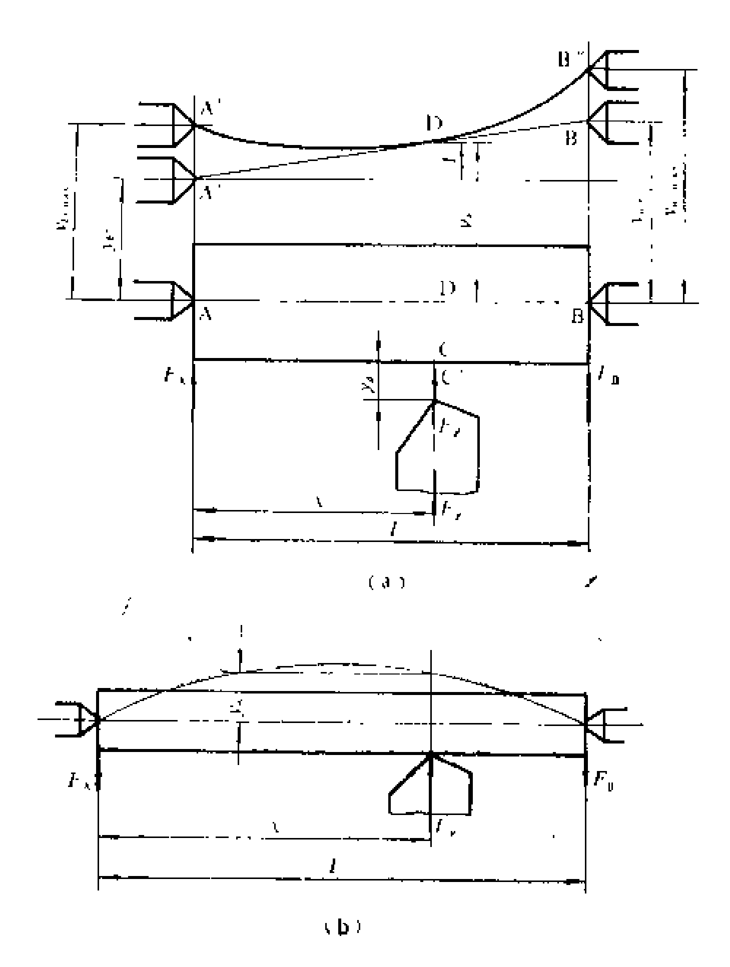


图2-22 工艺系统变形随受力点位置的变化而变化
（a）车削中机床的受力变形；（b）车削中工件的受力变形

在切削力的作用下，机床的头架，尾座要产生变形，刀架也要产生变形（刀架的变形量在工件的全长上为常值，它只影响工件直径精度，而不影响纵断面几何形状），它们的方向是相反的，但却都使工件尺寸加大，所以系统（即机床）的总变形是它们相加的结果。

在加工中，当刀架处于图示位置距床头顶尖为x时，在切削分力F_y的作用下，头架由A点位移到A′，尾座由B点位移到B′，刀架由C点位移到C′，它们的位移量分别用y_{tj}、y_{wz}及y_{dj}表示。而工件轴心线AB位移到A′B′，刀具切削点处工件轴线的位移y_x为

$$y_x=y_{tj}+\Delta_x$$

即

$$y_x=y_{tj}+(y_{wz}-y_{tj})\frac{x}{L}$$

若设F_A、F_B分别为F_y所引起的头架、尾座处的作用力，则

$$F_A=F_y\left(\frac{L-x}{L}\right),\quad F_B=F_y\frac{x}{L}$$

故

$$y_{tj}=\frac{F_A}{k_{tj}}=\frac{F_y}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right),\quad y_{wz}=\frac{F_B}{k_{wz}}=\frac{F_y}{k_{wz}}\frac{x}{L}$$

代入前式得

$$y_x=\frac{F_y}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{F_y}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2$$

$$y_{dj}=F_y/k_{dj}$$

由于刀尖与工件相对位置的变化等于机床的总变形量，而机床的总变形量为

$$y_{jc}=y_x+y_{dj}$$

$$=\frac{F_y}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{F_y}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{F_y}{k_{dj}} \qquad (2\text{-}6)$$

$$\frac{1}{k_{jc}}=\frac{1}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{dj}} \qquad (2\text{-}7)$$

当$x=0$时，$y_{jc}=\frac{F_y}{k_{tj}}+\frac{F_y}{k_{dj}}$；

当$x=L$时，$y_{jc}=\frac{F_y}{k_{wz}}+\frac{F_y}{k_{dj}}$；

当$x=\frac{L}{2}$时，$y_{jc}=\frac{1}{4}\left(\frac{F_y}{k_{tj}}+\frac{F_y}{k_{wz}}\right)+\frac{F_y}{k_{dj}}$。

式（2-6）是一个二次方程式，由于式中没有xy项及y^2项，即$B^2-4AC=0$，因此它是一个抛物线方程，下面确定其极值。

$$\frac{dy_{jc}}{dx}=-2\frac{F_y}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L^2}\right)+2\frac{F_y}{k_{wz}}\frac{x}{L^2}$$

$$\frac{d^2y_{jc}}{dx^2}=2\frac{F_y}{k_{tj}}\frac{1}{L^2}+2\frac{F_y}{k_{wz}}\frac{1}{L^2}>0$$

由此可见，存在极小值。对应于y_{jcmin}的x可求出如下

$$x=\frac{k_{wz}}{k_{tj}+k_{wz}}L$$

将x值代入式（2-6），得

$$y_{jcmin}=F_y\left(\frac{1}{k_{tj}+k_{wz}}+\frac{1}{k_{dj}}\right) \qquad (2\text{-}8)$$

通常$k_{tj}>k_{wz}$，因此在$x=L$（尾座）处变形最大。

即
$$y_{jcmax}=F_y\left(\frac{1}{k_{wz}}+\frac{1}{k_{dj}}\right) \qquad (2\text{-}9)$$

因此工件加工后的圆柱度误差Δ_{yzd}为

$$\Delta_{yzd}=y_{jcmax}-y_{jcmin}=\frac{F_y}{k_{wz}}-\frac{F_y}{k_{tj}+k_{wz}} \qquad (2\text{-}10)$$

在加工一批零件时，如果切削力不变，那么各个零件上所产生的这种形状误差均相同。

如设$k_{tj}=6\times10^4$N/mm，$k_{wz}=5\times10^4$N/mm，$k_{dj}=4\times10^4$N/mm，$F_y=300$N，工件长$L=600$mm，通过计算，已求出工件长度上系统（这里即机床）的位移如表2-1所示。

表2-1 系统（机床）变形数值

x	0（头架处）	$\frac{1}{6}L$	$\frac{1}{3}L$	$\frac{1}{2}L$（工件中点）	$\frac{2}{3}L$	$\frac{5}{6}L$	L（尾座处）
y_{xt}（mm）	0.0125	0.0111	0.0104	0.0103	0.0107	0.0118	0.0135

故工件的圆柱度误差$\Delta_{yzd}=0.0135-0.0103=0.0032$mm。

（2） 在两顶尖间车削细长轴〔图2-22（b）〕

由于工件细长，刚度小，在切削力的作用下，其变形大大超过机床、夹具和刀具所产生的变形。因此，机床、夹具和刀具的受力变形可略去不计，工艺系统的变形完全取决于工件的变形。

在加工中，当车刀处于图示位置时，工件的轴心线产生弯曲变形。根据材料力学简支梁的计算公式，其切削点的变形量为

$$y_w=\frac{F_y}{3EI}\cdot\frac{(L-x)^2x^2}{L}$$

现仍设$F_y=300$N，而工件尺寸为$\phi30\times600$mm，$E=2\times10^5$N/mm²，通过计算，已求出沿工件长度上的变形量如表2-2所示。

表2-2 工件变形数值

x	0（头架处）	$\frac{1}{6}L$	$\frac{1}{3}L$	$\frac{1}{2}L$（工件中点）	$\frac{2}{3}L$	$\frac{5}{6}L$	L（尾座处）
y_w（mm）	0	0.052	0.132	0.17	0.132	0.052	0

这时，工件的圆柱度误差$\Delta_{yzd}=0.17-0=0.17$mm。由此可见，后例中工件的变形量要比前例中机床的变形量大得多，所造成的圆柱度误差，后例比前例也大得多。

在一般情况下，机床产生的变形和工件产生的变形都不能忽视，这时产生的系统变形为

$$y_{xt}=F_y\left[\frac{1}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{dj}}+\frac{x^2(L-x)^2}{3EIL}\right] \quad (2\text{-}11)$$

系统刚度为

$$k_{xt}=\frac{1}{\frac{1}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{dj}}+\frac{x^2(L-x)^2}{3EIL}} \quad (2\text{-}12)$$

测得了车床三个部件的平均刚度k_{tj}、k_{wz}、k_{dj}以及确定了工件的材料和尺寸，就可以按x之值，估算车削圆轴时的工艺系统刚度。当已知刀具的几何角度、切削条件和切削用量（即已知F_y）时，利用（2-11）式就可以估算不同x处的系统变形量，亦即工件半径的变化量。

为了更形像起见，现将工艺系统的变形及其组成绘成图形，如图2-23所示。图中已表示出y_{xt}是由y_{jc}和y_w迭加而成，y_{jc}又是由y_{tjwz}、y_{dj}构成，而y_{dj}则沿工件全长是不变的。对于任意点x_1，$y_{x_1xt}=y_{x_1dj}+y_{x_1tjwz}+y_{x_1w}$。在靠近尾座（$wz$）一端，系统有一个最大变形量$y_{xtmax}$，在头架（$tj$）处，系统有一个最小变形值$y_{xtmin}$。在工件全长$L$范围内，除头架处外，其余各处的系统变形量均比头架处大。因此，头架处的系统变形量即y_{xtmin}可作为一

个定值，通过调整刀架的位置，以消除它对加工工件半径尺寸所造成的误差。所以，工艺系统的变形实际上造成被车削工件的圆柱度误差Δ_{yzd}为

$$\Delta_{yzd}=y_{xtmax}-y_{xtmin}$$

由此可见，Δ_{yzd}的大小，并不决定于工艺系统变形的最大值，而是决定于y_{xtmax}与y_{xtmin}之差。

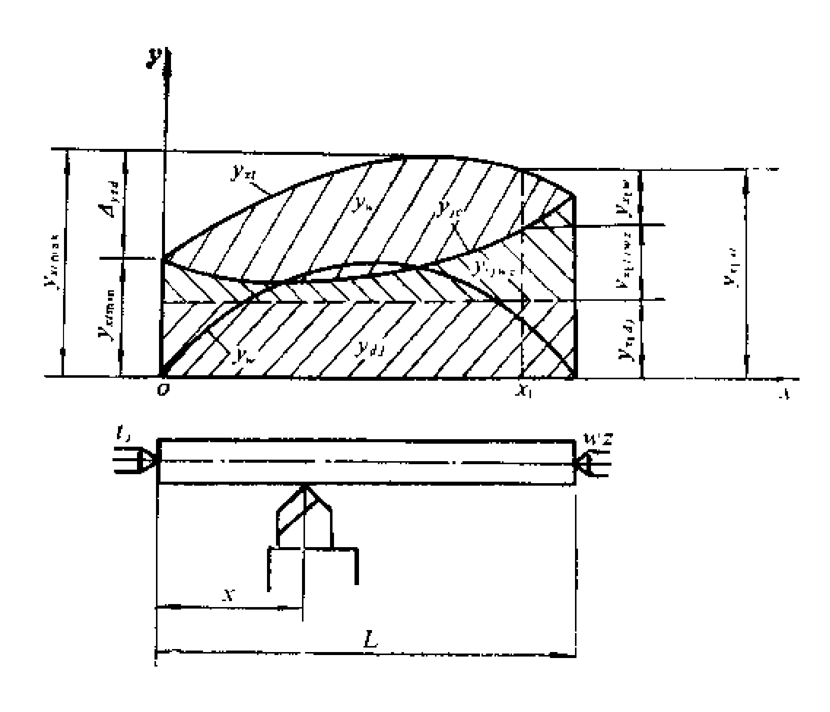


图2-23　工艺系统各部分的变形及其迭加

2．由于切削力大小的变化而产生的加工误差

在切削加工中，由于毛坯余量不均，材料硬度不均，上工序的制造误差或本工序的安装偏心等原因，引起切削力的变化。在工艺系统刚度为常值的情况下，工艺系统的变形随切削力的不断变化而变化，从而产生工件的加工误差。

用车刀横向进给割槽或纵向车一个短圆柱表面时，工艺系统的刚度可近似地看作是一个常量。

图2-24所示为车削一个短而有毛坯圆度误差的工件。先将刀尖调整到要求的尺寸（图中的虚线圆），然后进行车削，由于毛坯有圆度误差，致使刀具的切削深度a_p在a_{p1}和a_{p2}之间变化。a_p不同，切削分力F_y也不同。当切深由a_{p1}变到a_{p2}时，切削分力则由F_{ymax}变到F_{ymin}。由于切削分力的变化，根据前面的分析，工艺系统的变形将产生相应的变化，即由y_1变到y_2（刀具相对于被加工表面产生y_1到y_2的位移）。这样就形成被加工表面的圆度误差。这种现象称为毛坯"圆度误差复映"。误差复映的大小可通过系统刚度计算求出。

毛坯圆度的最大误差$\Delta_m=a_{p1}-a_{p2}$

车削后工件的圆度误差$\Delta_w=y_1-y$

根据前面所述以及切削原理有

$$y_1=F_{ymax}/k_{xt},\qquad y_2=F_{ymin}/k_{xt}\ ;$$

$$F_y=\lambda c_{Fy}a_p f^{0.75}$$

式中，$\lambda=F_y/F_z$，一般为0.3～0.5，常取0.4；c_{Fy}为与工件材料及刀具几何角度有关的切

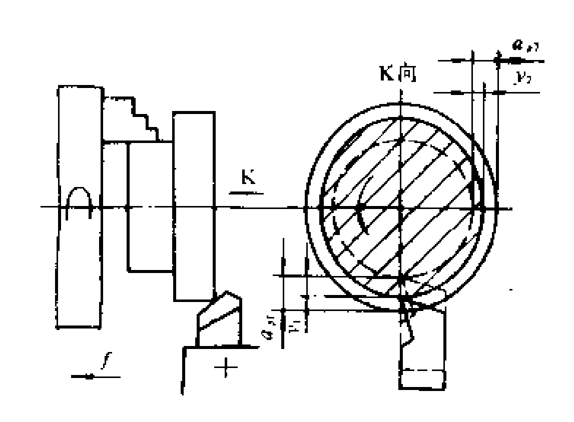


图2-24 毛坯形状误差的复映

削力系数，可从切削用量手册中查出；f为每转的进给量。

由于有系统变形y的存在，故切削深度a_p为名义值，而实际切深为（a_p-y）。但在一般情况下，y远比a_p为小，故实际切深（a_p-y）可近似地用名义切深a_p代替，于是可得

$$y_1=\frac{\lambda c_{F_y}a_{p1}f^{0.75}}{k_{xt}}，\quad y_2=\frac{\lambda c_{F_y}a_{p2}f^{0.75}}{k_{xt}}$$

$$\Delta_w=y_1-y_2=\frac{\lambda c_{F_y}f^{0.75}}{k_{xt}}(a_{p1}-a_{p2})$$

$$=\frac{\lambda c_{F_y}f^{0.75}}{k_{xt}}\Delta_m \qquad (2-13)$$

$$\frac{\Delta_w}{\Delta_m}=\varepsilon=\frac{\lambda c_{F_y}f^{0.75}}{k_{xt}}$$

或

$$\Delta_w=\varepsilon\Delta_m \qquad (2-14)$$

上式中出现的ε为加工误差与毛坯误差的比值，表示出两者之间的关系，反映了工件经过加工后毛坯误差减小的程度，称为误差复映系数。由于y的变化量远小于a_p的变化量，故ε是一个比1小得很多的系数。当工艺系统的刚度k_{xt}越高，ε就越小，复映到工件上的误差也就越小。

综上所述，毛坯有圆度误差，加工后的工件仍有圆度误差；毛坯有偏心，加工后的工件仍有偏心。但圆度误差和偏心程度为原来的ε倍。加工后的这种误差称为复映误差，这种误差传递规律，称为误差复映规律。

当毛坯误差较大，一次走刀不能满足精度要求时，可进行第二次或多次走刀，进一步消除由Δ_m复映的误差。这时，多次走刀总的复映系数ε_Σ为

$$\varepsilon_\Sigma=\varepsilon_1\cdot\varepsilon_2\cdots\varepsilon_n$$

$$=\left(\frac{\lambda c_F}{k_{xt}}\right)^n(f_1f_2\cdots f_n)^{0.75} \qquad (2-15)$$

由于ε与1相比小得很多，经过几次走刀后ε_Σ已下降到很小的数值了，加工误差也达到了允许的范围。这说明多次走刀（或多个工序）能够提高加工精度的道理，同时还可帮助建立机械加工过程是一个“渐精”过程的概念。它也说明了在制订工艺规程时，为什么一个加工表面要分成粗加工、半精加工、精加工和细加工等阶段才能获得高精度的原因。

毛坯材料硬度不均匀，引起切削力变化，同样会造成加工误差。

由（2-13）～（2-15）式可知，要提高加工精度（即减少复映误差），其常用措施是：提高工艺系统刚度；减小径向切削力或径向切削力系数（如用主偏角K_r接近于90°的车刀，减少进给量等）；减少毛坯误差（即前工序的加工误差）和增加走刀次数。

在成批、大量生产中，采用的是调整法加工，因为在加工过程中只能进行一次走刀，如果毛坯误差较大，通过误差复映，对每个零件来说，将产生形状误差，对一批零件来说，将扩大尺寸分散，导致一些零件超出允差而报废。

3． 由于传动力、惯性力、夹紧力和重力的作用所引起的加工误差

(1) 由于传动力作用引起的变形而产生的加工误差

在车床或磨床类机床上加工轴类零件时，常用单爪拨盘带动工件旋转，其传动力在拨盘的每一转中，经常改变方向，它在y方向上的分力有时和切削分力F_y同向，有时反向，从而使得刀具与工件在加工表面的法线方向上产生相应的相对位移，造成被加工工件产生几何形状误差。如图2-25(a)所示。若不考虑工件传动时需克服的磨擦阻力，则传动力F_c为

$$F_c=F_z r/L$$

式中　　F_z——切削力的垂直分力，(N)；

r——切削处工件的半径，(mm)；

L——传动力臂的长度，(mm)。

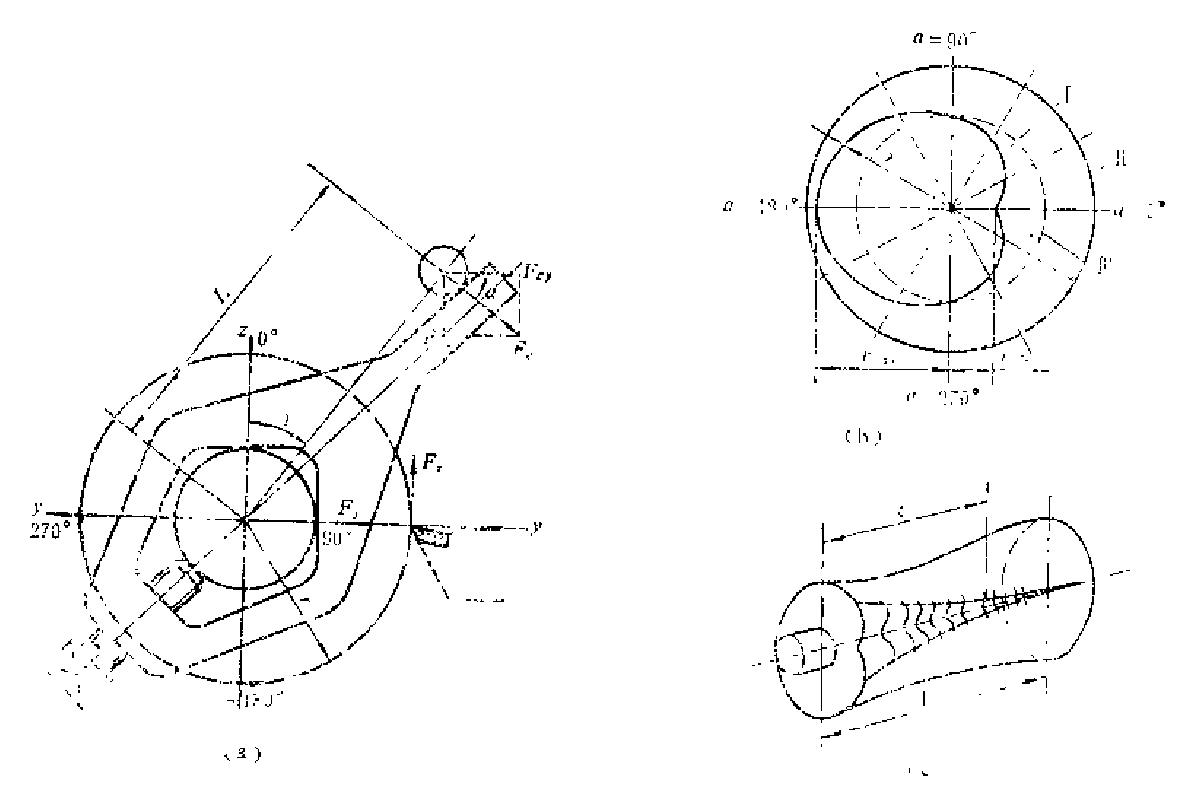


图2-25　传动力引起的变形对加工精度的影响

(a)传动简图；(b)传动力影响下工件横断面形状；(c)传动力影响下工件纵向形状

Ⅰ—加工后实际形状；Ⅱ—原始形状；Ⅲ—加工后理论形状

F_c可分解为F_{cy}和F_{cz}。由于F_{cy}处在误差敏感方向，它引起的系统变形对加工精度影响显著，因此，F_c所引起的变形(位移)y'(在头架处最大)为

$$y'=F_{cy}/k_{tj}=F_c\cos\alpha/k_{tj}$$

式中 k_{tj} ——头架顶尖处的刚度，（N/mm）；

α ——销钉回转角。

当$\alpha=90°$，270°时， $y'=0$

当$\alpha=0°$，180°时，$y'=\pm F_c/k_{tj}$

因此在0°，180°处相应地造成工件的最小半径r_{min}和最大半径r_{max}。

现设r为调整时工件的名义半径，如不考虑切削力引起的位移y（算总位移时可用迭加的办法），则加工时工件的实际半径r_t为

$$r_t=r-y'=r\left[1-\frac{F_c}{r}\frac{1}{k_{tj}}\cos\alpha\right]$$

$$=r[1-r'\cos\alpha] \qquad (2\text{-}16)$$

式中 $r'=F_c/rk_{tj}$

式（2-16）即为在传动力影响下工件横断面上形成的“心脏线”轮廓的极坐标方程式，工件的横断面形状如图2-25（b）的内部实线1所示。工件的这一误差接近于一个偏心圆。图2-25（c）为工件纵向形状，当刀具离开工件左端的距离x愈大，F_{cy}对工件的形状精度影响也愈小。

为了减少单侧传动力所引起的误差，在一些精密的加工中，例如在磨削机床主轴的内锥孔时，常采用双侧传动的拨盘，使两个F_{cy}大小相等方向相反，故顶尖在y方向上没有由于F_{cy}产生的位移，从而消除了这种误差。

（2） 由惯性力引起的变形而产生的加工误差

在切削加工中，高速旋转的零部件（包括夹具、工件和刀具等）的不平衡将产生离心力F_{lx}（$F_{lx}=mr\omega^2$，其中m为不平衡质量，r为不平衡质量到回转中心的距离，ω为回转角速度），它和传动力一样，在每一转中不断地变更方向，它在y方向上的分力有时和切削分力F_y同向，有时则反向，因此它引起的系统变形破坏了各成形运动的位置精度。图2-26（a）表示车削一个不平衡的工件，F_{lx}和F_y方向相反，将工件1推向刀具2，使刀具吃刀深度增加；图2-26（b）表示F_{lx}和F_y同向，工件1被拉离刀具2，使吃刀深度减小，其结果造成工件的圆度误差，其断面形状也是心脏形。

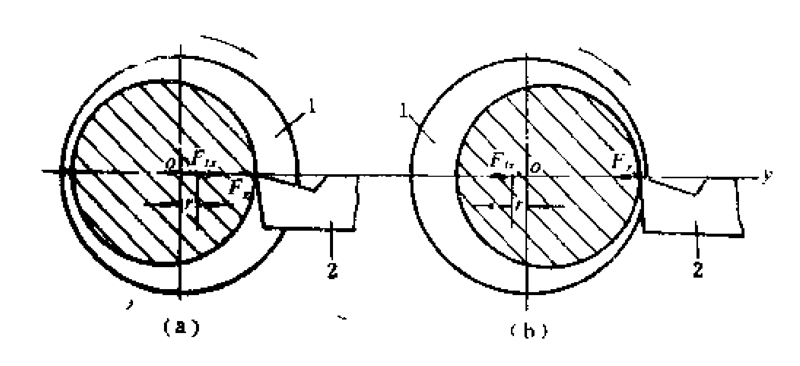


图2-26 惯性力所引起的加工误差

（a）F_{lx}与F_y方向相反，吃刀深度增加；（b）F_{lx}与F_y同向，吃刀深度减小

1—工件；2—刀具。

为了消除不平衡的离心力对加工精度的影响，常在不平衡质量的反向配置一平衡块，使两者的离心力互相抵消，从而使此项误差消除。但有时难于完全做到，故还需要适当地降低转速来减少离心力对加工精度的影响。

（3） 由于夹紧力引起的变形而产生的加工误差

被加工工件在安装过程中，由于工件刚度较低或夹紧力着力点不当，都会引起工件的相应变形，造成加工误差。图2-27所示为加工连杆大头孔的安装示意图，由于夹紧力着力点不当，引起工件的变形，破坏了定位，造成加工后两孔的中心线不平行以及与其定位端面不垂直。

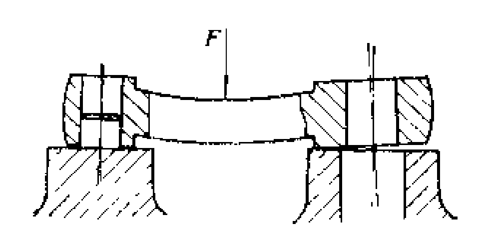


图2-27 夹紧力作用点不当引起的加工误差

（4） 重力所引起的加工误差

工艺系统中有关零部件自身的重力所引起的相应变形，也会造成加工误差。图2-28所示为摇臂钻床的摇臂2在主轴箱1自身重力的影响下所产生的变形，造成主轴轴线与工作台不垂直，从而使被加工的孔与定位面也不垂直。

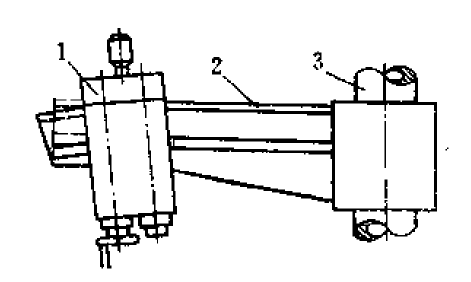


图2-28 主轴箱自身重力所引起的加工误差
1—主轴箱；2—摇臂；3—立柱

（四） 减少工艺系统受力变形的主要措施

减少工艺系统受力变形是机械加工中保证产品质量和提高生产率的主要途径之一。为了减少工艺系统受力变形对加工精度的影响，根据研究的成果和生产实际的经验，可从下列几方面而采取措施：

1. 提高结构刚度

在工艺系统中，机床、夹具的一些质量或体积较大的支承件，例如床身、立柱、横梁、夹具体等，它们本身的刚度对工艺系统的刚度有较大的影响，因此，应合理地选择其结构和断面形状，在节约材料和轻量化的基础上尽量提高其刚度。就结构而言，采用封闭式箱形结构比带筋结构好，因为前者较轻且刚度较好。若构件的断面面积相同，当断面由实心圆形、方形、矩形逐步改成空心时，由于空心断面的轮廓尺寸大，故其刚度大大提高。

在考虑提高系统刚度时，应首先从提高系统中刚度较低的部件着手，这样可使各部件的刚度趋于平衡，以便有效地提高整体的刚度。

2．提高接触刚度

由于影响部件刚度的因素较多，致使部件刚度大大低于相同外形尺寸的实体零件的刚度。在影响因素中，接触刚度是一个主要的因素，因此，提高接触刚度乃是提高工艺系统刚度的关键。

提高接触刚度的方法很多。首先在设计上应尽量减少接触面的数量，以相应地提高工艺系统的接触刚度；其次，若具有同量接触面时，应提高工艺系统连接表面的配合质量，以提高接触刚度。例如对机床导轨副进行刮研，配研顶尖锥体同主轴和尾座套筒锥孔的配合面，多次研磨加工精密零件用的顶尖孔等，都是生产中提高接触刚度的方法。

预加载荷不但可以消除配合面间的间隙，而且使零件从一开始就有较大的实际接触面积，从而提高了接触刚度。机床轴承所用的预加载荷装置，铣床主轴锥孔内常用的拉杆装置，都是这一方法的实际应用。

此外，还可采用其它方法来增加接触刚度。例如，车削平面只需横向进给时，就可把溜板锁紧在车床导轨上；铣削平面，不需作垂直进给，就可把升降台锁紧在立柱上等。

3．设置辅助支承

设置辅助支承，可以提高系统组成部分的刚度。例如，在六角车床上加工时，设置辅助支承（加强杆2伸入支承导套1内），可以大大地提高牌楼式刀架4的刚度（图2-29（a））；在两顶尖间车削细长轴时，根据材料力学的结论，工件的最大变形量为

$$y_{wmax}=F_yL^3/48EI$$

从该式可以看出，当工件材料和直径一定时，y_{wmax}取决于L^3和F_y。为了减少y_{wmax}，首先应减少支承长度，即设置辅助支承，如中心架或跟刀架；为了减少F_y，最有效的办法是改变刀具的角度，例如把车刀的主偏角磨成90°。在箱体孔系加工中，为了增加镗杆的刚度，常使用各种支承镗套。

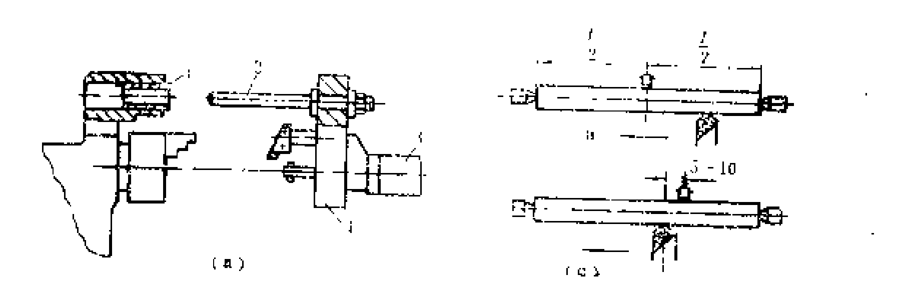


图2-29 设置辅助支承提高系统组成部分的刚度

（a）支承导套提高牌楼刀架刚度；（b）中心架提高工件刚度；（c）跟刀架提高工件刚度

1—支承导套；2—加强杆；3—六角转塔；4—牌楼刀架

图2-29（b）所示，为在工件长度L的一半处设置固定在床身导轨上的中心架作为辅助支承，使工件刚度提高了7倍；图2-29（c）所示为在离加工表面刀具5～10mm处，设置装在溜板上的跟刀架支承工件的情形，它使工件的刚度大大提高。

4．合理安装工件减少夹紧变形

对薄壁件，夹紧时应特别注意选择适当的夹紧方法，否则将引起很大的形状误差。图2-30所示为薄壁套筒的夹紧情况。图2-30（a）为未夹紧前工件1内外圆成正圆形，图2-30(b)

为夹紧不当，夹紧后工件成三棱形，图2-30（c）为镗孔后内孔呈正圆形，图2-30(d）为加工后，松开卡爪2，零件由于弹性恢复使镗好的孔成为三棱形。为了减少加工误差，应使夹紧力均匀分布，采用开口过渡环3〔图2-30(e)〕或用加宽了的专用卡 爪4〔图2-30（f)〕。

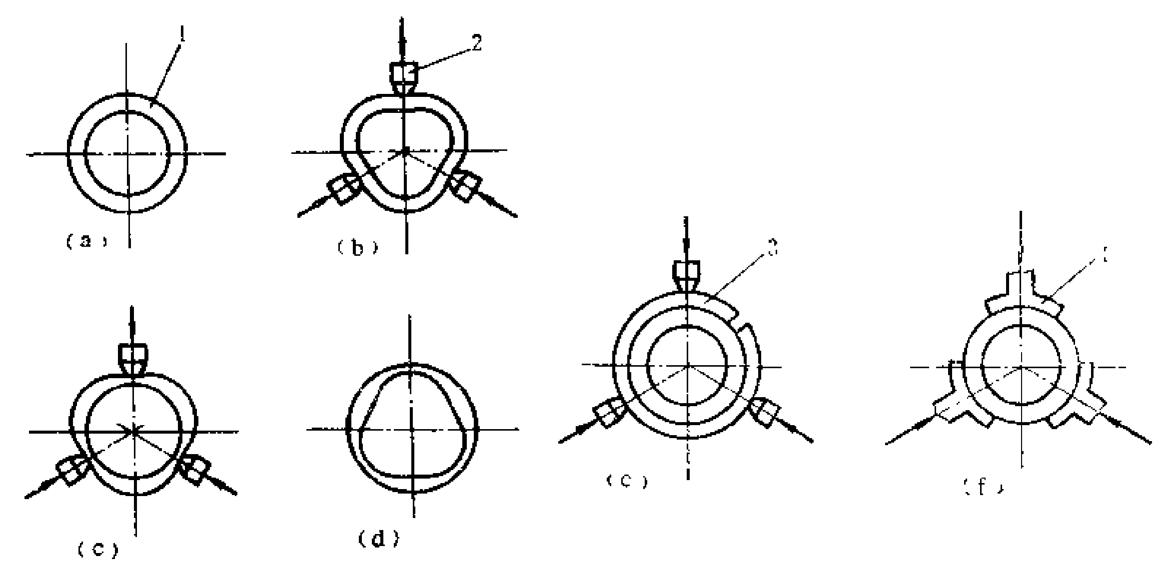


图2-30 零件夹紧变形所引起的误差

（a）夹紧前；（b）夹紧后；（c）加工内孔；（d）松开后；（e）用开口过渡环夹紧；（f）用加宽卡爪夹紧

1—工件；2—卡爪；3—开口过渡环；4—加宽卡爪

再如图2-31所示的对翘曲的薄板工 件进行磨 削的 情况。图2-31（a）为翘曲的 薄 板，图2-31（b）为薄板受磁 力工作台的磁力吸紧变平进行磨削的情况，图2-31（c）为磨完去掉磁力后，在已磨平的表面上由于弹性恢复又产生了翘曲。为了磨平工件，改进的办法是在工

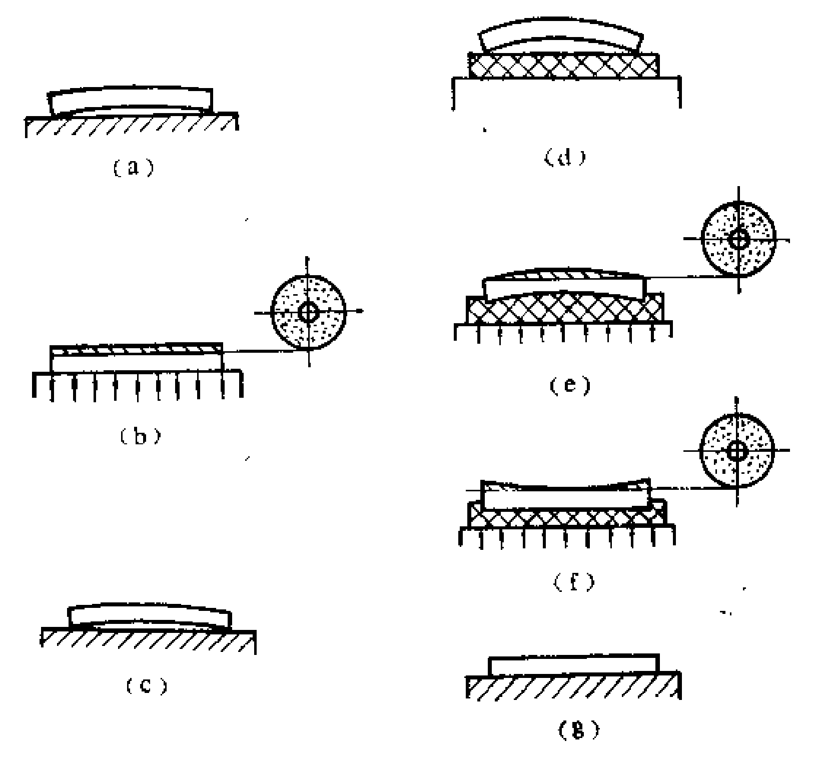


图2-31 薄板工件的磨削

（a）毛坯翘曲；（b）磁性工作台吸紧；（c）磨后松开（工件翘曲）；

（d）磨前；（e）磨削凸面；（f）磨削凹面；（g）磨后松开（工件平直）

件和磁力工作台之间垫一厚为0.5mm的橡皮垫，如图2-31（d），工件被磁力吸紧时，橡皮垫被压缩，减少了工件的变形，便于将工件的弯曲部分磨去，如图2-31（e）、（f）所示。这样经过多次正反面交替磨削即可获得平面度较高的平面〔图2-31（g）〕。

八、工艺系统的热变形所引起的误差

（一）概述

在机械加工过程中，工艺系统要产生与接受热量，热的来源主要有三方面：

1. 切削热　即被加工材料塑性变形以及前后刀面摩擦功转变成的热量。切削热Q由切屑、刀具、工件、冷却润滑液以及周围介质吸收和传走，热量的分布与加工方法、加工条件以及工件结构有关。例如在不加冷却液的情况下，热量Q的分布如表2-3所示。

表2-3　几种加工热量分配情况

加工方法 \ Q	Q_x	Q_d	Q_w	Q_j
车　削	50～86%	3～9%	10～40%	1%
钻　削	～28%	～14.5%	～52.5%	～5%
磨　削	＜5%	＜15%	＞80%	

表中，Q_x、Q_d、Q_w、Q_j分别代表传给切屑、刀具、工件及周围介质的热量。

在车削加工中，切屑所带走的热量最多。切削速度越高，切屑热传给工件和刀具的时间相应减短，故Q_x所占的比例就越大。高速切削时，通常Q_w与Q_d分别在10%、5%以下。

在钻削加工中，因有较多的切屑留在孔内，所以传给工件的热量比较多，通常Q_w大于50%。

在磨削加工中，大部分热量传入工件，工件表面与砂轮间形成的磨削区的温度可达800～1000℃左右，这时工件热变形的影响就不可忽视。

2. 摩擦热　它是机床运动部件在一定负荷下运动，为克服摩擦而消耗的部分机械功所转变成的热。例如轴承副、齿轮副、导轨副、液压传动以及电动机的升温等，这类热对机床的影响较大，都会使机床产生热变形。

3. 周围环境传来的热　例如环境温度、暖气设备和阳光照射等。

上述三种热源，前两者属工艺系统的内部热源，后者为外部热源。由于这些热的作用，使工艺系统各部分产生大小不均匀的热变形，从而改变了工艺系统各组成部分之间的相对位置；破坏了工件和刀具相对运动的正确性；改变了刀具尺寸；引起了工件体积的变化而使刀具的切深和切削力改变，引起加工误差，影响加工精度。

在不同的加工情况下，工艺系统的热变形对加工精度有着不同的影响。粗加工时，由于工件的公差较大及切削力较大，工艺系统的受力变形引起的误差较大，而热变形所引起的误差在总误差中只占较小的部分；在精密加工时，由于切削力一般都比较小，工艺系统刚度不足所引起的加工误差也比较小，而热变形所引起的加工误差就相对地加大了，常占加工误差的40～70%。在大件加工中，温度变化的影响要比小件加工显著得多。因此，在精密加工和大件加工中，工艺系统的热变形所引起的加工误差比较突出，应给予足够的重视。

（二）机床热变形所引起的加工误差

在工艺系统的热变形中，以机床的热变形最为复杂。由于各种机床的结构和工作条件差

别很大，因此引起热变形的热源也大不相同。概括起来引起机床热变形的热源可以分为三类：

1． 主要热源来自于机床的主传动系统　例如车床、铣床、镗床和磨床的砂轮头架等。

2． 主要热源来自于机床导轨的摩擦　例如龙门刨床、牛头刨床和立式车床等。

3． 主要热源来自于液压系统　例如磨床工作台和液压仿形车床的仿形刀架等。

对于机床热变形的研究，由于影响的因素繁多而情况复杂，所以目前大多采用实验测试的方法。现以车床为例进行讨论。车床的主要热源是床头箱。床头箱内齿轮、轴承、离合器、皮带轮等的摩擦发热，会导致主轴在垂直面内和水平面内的位移和倾斜，也会使床身上固定床头箱的平面受热而弯曲。床鞍和床身导轨的摩擦发热也将使导轨面受热，因而将使床身弯曲成中凸形。图2-32所示为某车床以1200r/min，运转6小时达到热平衡（机床产生的热量和扩散到周围空气介质中去的热量基本相等）后所测得的结果。图2-32（a）为温度场的分布情况（图中"○"旁边的数字为实测机床该点温升）。从图中可以看出，对主轴箱来说，右面前轴承温升高于后轴承。对床身来说，由于热源来自主轴箱，所以左面的温度高于右面，特别是床面到床脚有14℃的温差，这就导致床面膨胀量大于床脚膨胀量，使床身产生往上拱的弯曲。由于床身弯曲使主轴中心线从a移b至；由于主轴箱的温差作用，又使主轴的中心线进一步由b移至c（右面温升大，升高多一些），造成主轴中心线位置的抬高和倾斜。图2-32（b）为实测该车床所得的时间-变形曲线。由图可见，主轴的抬高量为140μm，主轴在垂直面内的倾斜为60μm/300mm。主轴倾斜误差的75%来自床身的弯曲，而前后轴承的温差所造成的误差只占25%。主轴在水平面内的位移相对来说较小，约为18μm，倾斜为0.3～0.8μm/300mm，但由于它处于误差敏感方向，对加工精度的影响是不能忽视的。

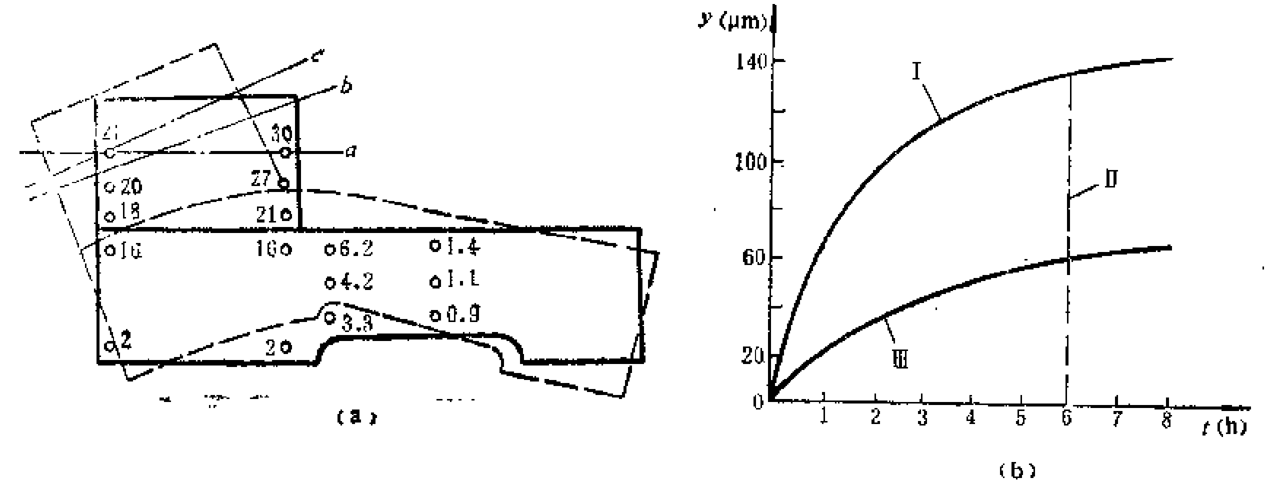


图2-32　车床的温度分布和热变形

（a）车床工作时的温度分布及热变形；（b）车床主轴受热变形情况

Ⅰ—主轴抬高；Ⅱ—热平衡；Ⅲ—主轴倾斜

为了减少机床热变形对加工精度的影响，可以从下列两方面采取措施：

1． 结构上的措施

（1）　减少热量的产生　这是根本的办法。没有发热就没有热变形，减少发热就会减少热变形。机床上产生的热量主要来源于运动副的摩擦热。要减少摩擦热，就要减少摩擦系数。例如采用气动或液压支承、滚动轴承代替滑动轴承，这样可大大减小摩擦系数，从而减少摩擦力和摩擦热。为了减少主轴箱的发热，就必须减少主轴轴承的发热，为此必须改善轴承的

润滑条件，如采用低粘度的润滑油和锂基润滑脂等；同时还要提高齿轮的传动精度（如采用较高精度的齿轮、提高轴孔的位置精度及改善装配质量等）并配以油雾润滑（使传动表面之间产生薄油膜以减少润滑油的发热），以减少传动副的发热。

（2）采用热对称结构　例如B665牛头刨床的滑枕，导轨在其下面，其横截面如图2-33(a)所示。滑枕移动对工作台面的平行度一直不稳定。主要原因是由于高速运动的滑枕产生了热变形。其底部热膨胀量比上部大，使滑枕发生弯曲变形，如图2-33（b）中的虚线所示，变形量可达0.25mm。后将其结构作了改进，把导轨布置在滑枕截面中间，如图2-33（c）所示。这样，使滑枕翘曲变形降到0.01～0.015mm，达到了合格标准。

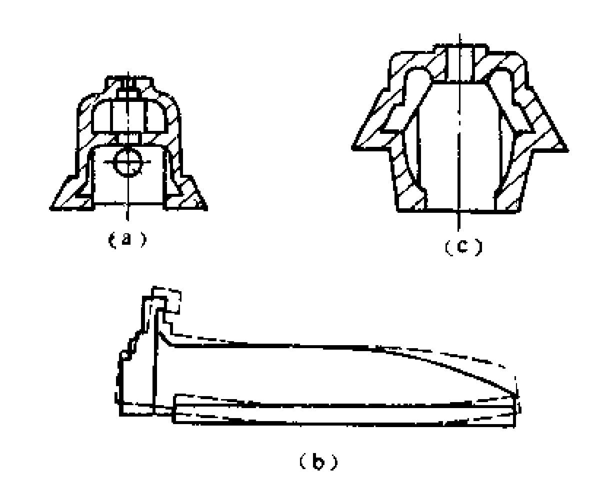


图2-33　牛头刨床滑枕截面、变形及其改进
（a）滑枕横截面示意图；（b）滑枕热变形示意图；（c）改进后的滑枕横截面示意图

（3）使关键件的热变形在无害于加工精度的方向上移动　图2-34所示为车床主轴箱与床身的连接结构，A为装配基准之一。若按图2-34（a）所示进行装配，那么主轴箱的热膨胀既使主轴轴线产生垂直位移又产生水平位移，因而影响加工精度；若将装配基准A设在主轴的正下方，如图2-34（b）所示，这时主轴箱的热膨胀不会使主轴轴线在水平方向（即y方向）发生位移，在垂直方向（z）虽有位移，但不影响加工精度。

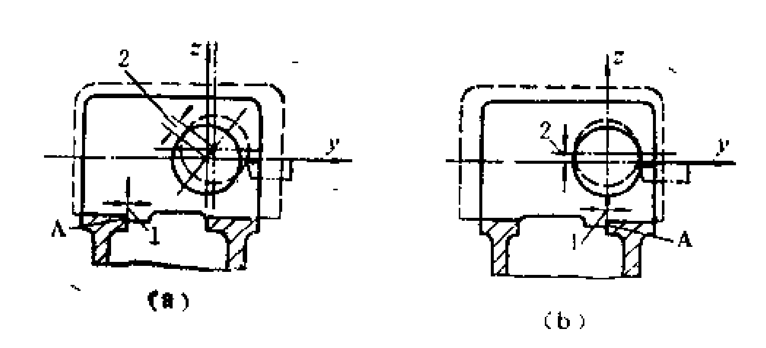


图2-34　主轴箱装配基准A的设置对主轴热位移的影响
（a）主轴横向热位移大；（b）主轴横向热位移小
1—热变形方向；2—主轴轴线热位移量

此外，还有一些其它的办法，例如：合理安排支承位置，使产生热变形的有效部分缩短（在磨床中，控制砂轮架在y方向位置的丝杠有效长度尽量缩短）；对发热量大的热源采用

足够的冷却；均衡关键件的温升，避免弯曲变形以及将某些热源从机床中移至机外，等等。

2．工艺上的措施

（1）精加工前，应让机床空转一段时间，等到温度升高达到或接近热平衡之后再进行加工。为了缩短机床空转的时间，有时采用比工作速度为高的速度空转，以迅速预热。

（2）精加工大型工件（如齿轮）时，其加工时间可能要一个班次以上，这时不能中间停车，应连续加工完毕，否则会出现明显的刀痕。

（3）当顺次加工一批工件时，操作者由于生活需要间断工作时，最好不要停车，以免破坏机床的热平衡，使调整好的位置尽量保持不变。

（4）在安装机床的区域内，应尽量保持较稳定的环境温度；精密机床不应受到阳光的直接照射。

（5）对精密加工机床，例如精密磨床和车床、坐标镗床、螺纹磨床、曲线磨床、齿轮磨床、刻线机等等应放在标准温度为20℃的恒温室内加工。

（三）刀具的热变形所引起的加工误差

刀具热变形的热源主要是切削热，虽然切削热大部分被切屑带走，传给刀具的热量不多，但刀具体积小，热容量小，所以刀具的工作表面通常被加热到很高的温度，例如高速钢车刀刀刃部分的温度可达700～800℃，这不仅使刀具受热伸长（一般为0.03～0.05mm）而影响加工精度，同时刀具的硬度也会降低。刀具的热伸长，对于加工中、小零件，一般只影响尺寸精度；对于加工大型零件，还会影响形状精度。

图2-35所示为车削时车刀热变形与车削时间的关系曲线。图中曲线A是车刀连续切削时（如车长轴）的热变形曲线，在刚开始切削的一段时间里刀具热伸长较快，对加工精度影响显著，但经过10～20分钟以后，即可达到热平衡，此时热变形基本稳定，对加工精度影响很小。

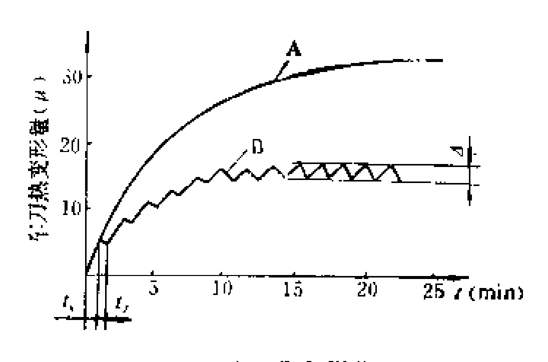


图2-35　车刀热变形曲线

在实际生产中，连续切削的情况是比较少。由于要更换工件，切削加工往往是不连续的。这时车刀的热变形与时间曲线如图2-35中曲线B所示。在切削时间t_d内变形增加，在间断切削时间t_j内变形减小；一定时间后接近于热平衡，其曲线总的趋势不再上升，亦即切削时间的温升等于间断切削时间的温降，使加工每一工件时刀具变形控制在图中“Δ”范围内。曲线B要比曲线A低一些，即连续切削刀具的热变形要比间断切削刀具的热变形大。用调整法加工一批工件时，开始加工的零件尺寸会逐渐减小，当达到热平衡后，其热变形趋于稳定，这时波动量保持在Δ范围内，对精度的影响就不明显，若考虑到切削中刀具的磨损，这种影响就更微小。

为了减少刀具热变形所引起的加工误差，一般可采用下列措施：

（1） 施加充分的冷却润滑液，改善散热条件；

（2） 减小刀具伸出长度，加大刀杆横截面积；

（3） 改进刀具几何角度，减少切削热；

（4） 合理选择切削用量等等。

（四） 工件热变形所引起的加工误差

工件在机械加工中的热变形，主要是由于切削热的作用。工件在切削过程中的热变形有两种情况：一是比较均匀的受热，如车、镗、磨内、外圆等加工；另一是不均匀的受热，如刨、铣、磨平面等工序。

工件均匀受热时，在一般情况下主要是影响尺寸精度，有时对几何形状精度也有一定影响。例如加工盘类及长度较短的轴、套类工件时，热变形主要影响尺寸精度；磨削丝杠时，热变形是影响螺距累积误差的主要因素；车削长轴时，工件热变形的结果会产生圆柱度误差。工件均匀的热变形所引起的尺寸误差（对长度为ΔL，对直径为Δd）为

$$\Delta L=\alpha L\Delta t \text{ mm} \qquad (2\text{-}17)$$

式中 α——材料的线膨胀系数；

L——工件在热变形方向上的长度，（mm）；

Δt——工件温度升高值(在图2-36中为$\Delta\theta$，$\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$)，（℃）。

通常精加工中，工件热变形的影响比较突出，特别是工件较长而精度要求又高的零件。在粗加工中，工件热变形对加工精度的影响较小，但在高生产率的工序集中场合，粗加工的热变形给精加工带来了不良后果，例如钻孔后立即接着铰孔，往往使孔在工件冷却后尺寸偏小，以致影响加工精度。

如果工件受热不均匀，只一面受热，由于温度差将导致工件拱起，中间被多切去，加工完毕冷却后，加工表面就产生中凹误差。现以磨削薄片工件为例说明如下：

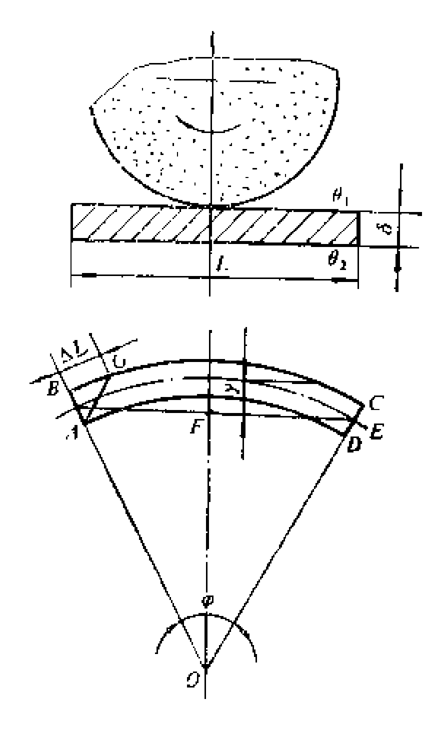


图2-36 薄片磨削时的热变形

图2-36所示，工件长度为L，厚度为δ，上表面单面受热，并假设上表面温度均匀一致，在上下表面之间形成温度差，上表面相对于下表面有伸长量ΔL，从面导致工件的翘曲变形，中部凸起，两端面AB、CD形成一φ角。以y代表工件中心点的变形量，由图可知

$$y=OE-OF,\quad OF=OE\cos\varphi/2$$

则
$$y=OE(1-\cos\varphi/2) \tag{2-18}$$

将$\cos\varphi/2$按幂级数展开，并近似地取前面两项

$$\cos\frac{\varphi}{2}=1-\frac{(\varphi/2)^2}{2!}+\frac{(\varphi/2)^4}{4!}-\frac{(\varphi/2)^8}{8!}+\cdots\approx 1-\frac{(\varphi/2)^2}{2}=1-\frac{\varphi^2}{8}$$

而　$OE\times\varphi/2\approx L/2$（即工件中线的弧长近似地等于工件的原长）

故
$$OE\approx L/\varphi$$

代入（2-18）式　$y=(L/\varphi)(1-1+\varphi^2/8)$

$$=L\varphi/8 \tag{2-19}$$

因$AG\,/\!/\,OE$，故$\overset{\frown}{BG}$即为上表面热膨胀量ΔL，而$\angle BAG=\varphi$，由于φ很小，且$AB=\delta$，

故
$$\varphi\approx \mathrm{tg}\varphi\approx\Delta L/\delta=\frac{\alpha L\Delta t}{\delta}$$

代入（2-19）式
$$y=\frac{\alpha L^2\Delta t}{8\delta} \tag{2-20}$$

由于中凸量y被磨去，冷却后，工件中部呈凹入量为y的凹形。

由式（2-20）可见，变形量y与工件长度平方成正比，而与厚度成反比。因此，在平面磨床上磨削薄而长的工件时，工件的热变形问题必须很好地控制。对于具体工件来说，L、δ、α均为定值，要控制热变形量y，就必须减少温差Δt，也就是要减少切削热的传入。

对于厚大工件，例如对车床导轨的磨削，同样也会发生问题。导轨磨削一般不采用冷却液（加冷却液会使清理加工面困难，同时目前导轨磨床大多没有防溅装置），如果床身上下表面温度差$\Delta\theta$为2.4℃，便使床身上凸变形0.02mm，加工时上凸部分被磨去，冷却后导轨面产生形状误差为下凹0.02mm(图2-37)。为了避免磨削时导轨面的热变形，有时不得不降低切削用量，甚至中途停车，待冷却后再加工，因此影响生产率。

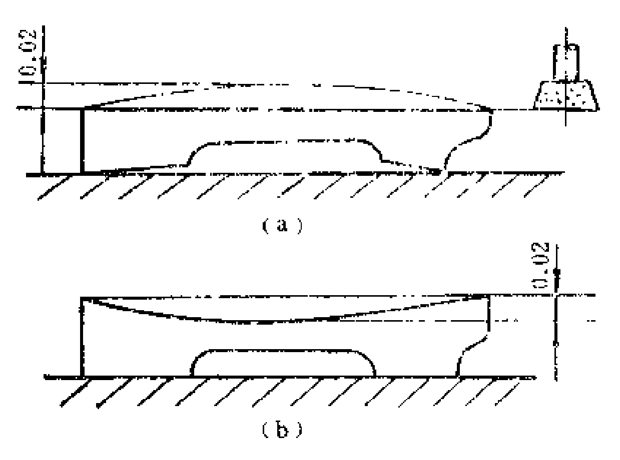


图2-37　磨削热引起的导轨面变形及下凹误差
（a）加工中；（b）加工后

为了减少工件热变形对加工精度的影响，通常采取的措施是：

1. 在切削区施加充分的冷却液；

2. 提高切削速度或进给量，使大部分热量由切屑带走，以减少传入工件上的热量；

3. 粗加工以后将工件停放一段时间进行冷却，待热变形消失后再进行精加工（即将粗、精加工分开，不连续加工）；

4. 刀具和砂轮尚未过分磨钝就进行刃磨和修正，以减少切削热和磨削热；

5. 使工件在夹紧状态下有伸缩的自由，以补偿其热变形。例如在磨床、多刀车床上采用弹簧后顶尖、液压后顶尖或气动后顶尖等。

九、工件内应力的重新分布所引起的误差

工件去掉外力后，存留在工件内部的应力称为内应力，或叫残余应力。内应力总是拉伸应力和压缩应力并存的，这些内应力成平衡状态，即合力等于零。内应力平衡状态极不稳定，总是有强烈的倾向要恢复到无应力的稳定状态。即使在常温下，零件也会不断地进行这种变化，直到内应力完全松弛为止。当工件存在有内应力时，若外界条件发生变化，如温度改变或被切除一层金属，则原来的内应力平衡状态遭到破坏，工件将发生形状变化，并形成新的平衡状态。这个形成新的平衡状态的过程，叫做内应力重新分布。内应力重新分布而发生的变形，在粗加工时表现得最为突出。

内应力是由于工件材料内部相邻组织发生了不同的比容变化而产生的，主要原因有：

1. 工件各部分受热不均或受热后冷却速度不同，产生了局部的热塑性变形

工件不均匀受热时，各部分温升不一致，高温部分的热膨胀受到低温部分的限制而产生温差应力(高温部分有温差压应力，低温部分是拉应力），温差越大则应力也越大。材料的屈服极限是随温度升高而降低的，当高温部分的应力超过已降低了的屈服极限时，便会产生一定的塑性变形，这时低温部分仍处于弹性变形状态。冷却时由于高温部分已产生了压缩的塑性变形（即缩短了），收缩时受到低温部分的限制，故冷却后高温部分产生残余拉应力，低温部分则带有残余压应力。

工件均匀受热后如各部分冷却速度不同，也会产生内应力。例如图2-38（a）所示铸件，浇铸后A、C部分壁薄，冷却速度快，B部分壁厚，冷却速度较慢，因此A、C部分先进入低温弹性状态，这时B部分仍处于高温塑性状态，故A、C部分的冷收缩不受阻碍。当B部

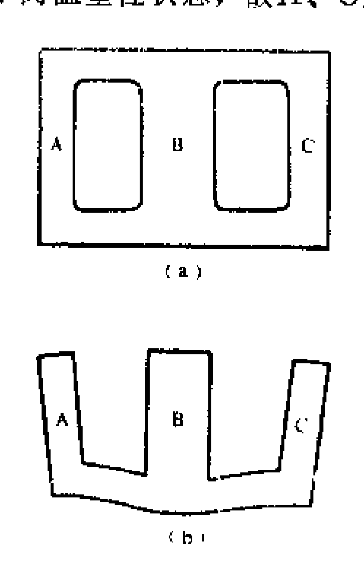


图2-38 壁厚不同的铸件加工后残余应力所引起的变形

（a）正常状态；（b）切开后的变形

分进入低温弹性状态时，A、C部分已基本上冷却了，故B部分的冷收缩受到已冷却的A、C部分的阻碍，结果B部分存在残余拉应力，A、C部分存在残余压应力。这时若把上面的连接部分切去，内应力就会重新分布，A、C部分因残余压应力释放而微有伸长，B部分的残余拉应力释放而微有缩短，下面连接部分将产生如图2-38（b）所示的变形。

2．工件冷态受力较大，产生局部的塑性变形

细长杆件在轧制及运输过程中要产生弯曲。在切削加工前需要纠正这种弯曲变形，常用的办法是冷校直。冷校直就是使工件在冷态下产生局部的塑性变形。例如枪管从毛坯到成品整个工艺过程要进行5～8次的冷校直。具体的方法是：将弯曲的工件放在两个支承（V形块）上，并使其凸部向上，如图2-39（a）所示；然后，在工件的凸面上施加外力F，使工件产生反向弯曲，并使其产生一定的塑性变形，如图2-39（b）所示；这时，工件外层应力超过了屈服极限，而其内层还在弹性极限之内，故内层ab段可用直线表示应力图形，而外层bc和ad两段内，因产生了塑性变形，故其应力将沿着类似拉伸曲线上超过比例极限外的那段曲线变化，如图2-39（c）所示；去掉外力F后，工件内层弹性恢复，而外层残留有塑性变形，故工件原来的弯曲被减小或消除了，但工件内部却产生了如图2-39（d）所示的内应力。所以冷校直的零件或毛坯在进行下一步加工时，一般都还在内应力状态下，当从表面再切去一层金属时，内应力的平衡又遭到破坏，引起内应力的重新分布，使零件又产生新的弯曲变形。这种变形有时需要很长时间，因此对于细长的精密丝杠，不采用冷校直的方法。

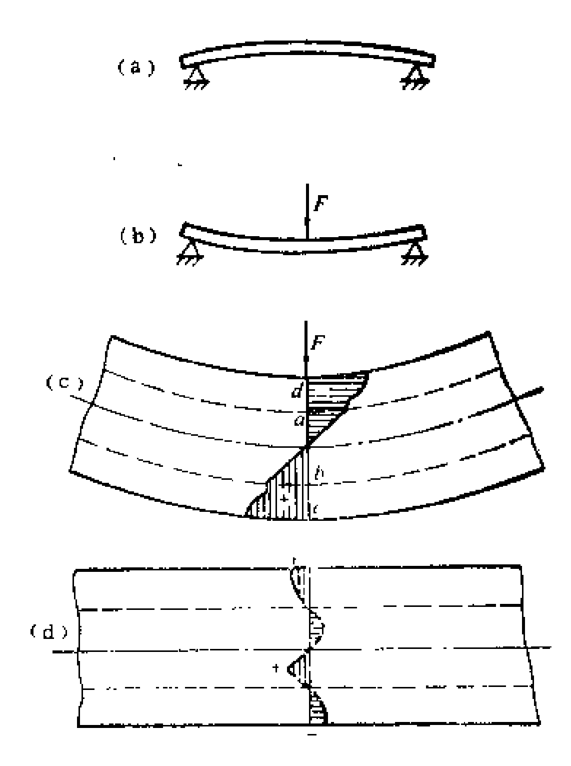


图2-39 冷校直产生的残余应力

（a）施力前工件形状；（b）施力中工件变形；（c）施力时横截面应力分布；（d）施力后工件形状及应力分布

3．金相组织转化不均匀

不同金相组织的比容不同，例如马氏体的比容大于屈氏体、奥氏体等。淬火时，奥氏体

转变为马氏体，体积膨胀，这时如金相组织转化不均，则转变为马氏体部分的体积膨胀受阻就会产生残余压应力（未转变部分则带有残余拉应力）。反之，回火时马氏体转变为屈氏体，如金相组织转化不均，则转变为屈氏体部分的体积收缩受阻，就会产生残余拉应力，未转变部分则产生残余压应力。

以上三种原因在机械制造的许多工艺过程中都有可能发生。例如铸造壁厚不的铸均件，由于冷却速度差别较大，会使铸件残存有内应力；锻造过程中加热、冷却不均或塑性变形不均，会使锻件带有残余应力；焊接时工件局部受高温，也会产生残余应力；切削加工时表面层发生强烈的局部的塑性变形，同时还由于切削热的作用，表层温度变化也不一致，都会产生残余应力；磨削加工时切削热往往会使工件局部达到相变温度，故还可能引起金相组织转化不均而产生的残余应力。因此在机械加工过程中，往往是毛坯进入机械加工车间时已带有残余应力。在机械加工过程中，一方面切除表面一层金属，使残余应力重新分布，原有的残余应力逐步松弛而减少，另一方面又会产生新的残余应力。由于加工总是从粗到精，切削力、切削变形、切削热等是随着加工的精细而相对地减小的，只要加工过程中工艺参数合理，不进行冷校直和淬火的话。总的来说，残余应力总是在从粗加工到精加工的过程中逐步减少的。

为了减少或消除内应力，通常可采用下列措施：

1．进行时效处理　时效处理可分为自然时效和人工时效。

（1）　自然时效处理　对于一些要求高的精密零件在其毛坯制造之后或粗、精加工之间，让工件停留一段时间，利用温度的自然变化，经过多次热胀冷缩，使工件晶体内部或晶界之间产生微观滑移，从而达到减少或消除内应力的目的，这一过程叫自然时效处理。对于大型精密件（如床身、箱体等）这一过程需要几个月甚至几年的时间，往往影响产品的制造周期，所以除特别精密件外，一般较少采用。

（2）　人工时效处理　它是在工艺过程中用增加专门工序来消除内应力的一种方法，也是目前使用最广的一种方法。例如对铸、锻、焊接件进行的退火或回火；零件淬火后的回火；对精度要求高的零件如床身、丝杠、箱体、精密主轴等在粗加工后进行的时效处理（对一些要求极高的零件如精密丝杠、标准齿轮、精密床身等则要在每次切削加工后均要进行时效处理）。常用的人工时效处理方法有：

（i）　高温时效　将工件以3～4小时的时间均匀地加热到500～600℃，保温4～6小时后以每小时20～50℃的冷却速度随炉冷却到100～200℃取出，在空气中自然冷却。高温时效一般适用于毛坯或粗加工之后。

（ii）　低温时效　将工件均匀地加热到200～300℃，保温3～6小时后取出，在空气中自然冷却。低温时效一般适用于半精加工之后。

（iii）热冲击时效　将加热炉预热到500～600℃，保持恒温。然后将铸件放入炉内，当铸件的薄壁部分温度升到400℃左右（因铸铁件一般在350℃以上开始进入弹塑性温度区域），厚壁部分因热容量大而温度只升到150～200℃左右（由放入炉内的时间来控制），及时地将铸件取出，在空气中冷却，即可达到消除内应力的目的。热冲击时效耗时少（一般只需几分钟），适用于有中等应力的铸件。

（iv）　振动时效　它是以激振的形式将机械能加到含有大量内应力的工件内，引起工件金属内部晶格位错蠕变、转变，使金属的结构状态稳定，以此来减少和消除工件的内应力。它可用于铸件、锻件、焊接件以及有色金属件等。操作时，将激振器牢固地夹持在工件

的适当位置上，根据工件的固有频率调节激振器频率，直至达到共振状态，再根据工件尺寸及内应力调整激振力，使工件在一定振动强度下，保持几分钟甚至几十分钟的振动，这样可消除内应力。这种方法不需要庞大的设备，所以比较经济、简便，且效率高。

当没有振动时效处理设备时，还可用机械敲击的方法来达到冲击时效的目的。例如对于小零件，可将它们同一些小铁块或专用零件一起装入滚筒内，当滚筒旋转时，使其互相撞击；对于尺寸较大的某些工件，还可把它挂起来用锤子敲击工件上由厚过渡到薄的地方。

2. 合理安排工艺过程

例如粗精加工分开在不同工序中进行，使粗加工后有一定时间让残余应力重新分布，以减少对精加工的影响。在加工大型工件时，粗精加工往往在一个工序中完成，这时应在粗加工后松开工件，让工件有自由变形的可能，然后再用较小的夹紧力夹紧工件进行精加工。再如焊接时工件先经预热以减少温差，并合理安排焊接顺序，也可减少内应力的产生。对于精密的零件，在加工过程中不允许进行冷校直（有必要进行校直时可改用热校直）。

3. 合理设计零件结构

在零件结构设计中，应简化零件结构，提高零件的刚性，并应尽量缩小零件各部分厚度尺寸间的差异，以减少铸、锻件毛坯在制造中产生的内应力。

十、度量误差

工件加工后能否达到预定的加工精度，必须用度量结果加以鉴别。为了防止废品的产生，不仅工艺系统调整必须以度量结果为依据，而且在加工过程中还必须随时依靠测量手段来防止工件超差。度量误差就是工件度量尺寸与实际尺寸的差值。度量上有了误差，必然会引起加工产生误差。

产生度量误差的原因是：量具本身的制造误差〔如刻度不准确，不符合“阿贝原则”（指测量时工件上的被测量线应与量具上作为基准尺的测量线在同一直线上）所产生的“阿贝误差”等〕和使用中的磨损；量具与工件的相对位置不正确（如量孔径时，测量头偏离孔径，量得的是弦长）；在度量过程中使用的度量力不一致或力量过大而引起的量具或量仪变形；量具与工件的温度不同或两者材料膨胀系数不等所引起的热变形量；测量时产生视差所引起的读数误差等等。在这些原因中，有些原因是与测量者的经验、技能等主观因素有关。此外，周围环境有振动（使工件位置变动和量具读数不稳定）、工件有毛刺以及净化程度差也会引起度量误差。

度量误差太大时，则加工方法本身所允许的加工误差必须减小，因而增加了加工的困难。例如，要求工件尺寸为100±0.1mm，如果度量误差为±0.05mm，则加工出来的尺寸必须不超过100±0.05mm。使用不同的量具，有不同的度量误差。例如用光学比较仪度量轴类零件时，误差不超过1μm；用百分尺时，度量误差可达5～10μm；而用游标卡尺时一般在40μm以上，最大可达150μm，所以必须根据工件被测尺寸所要求的加工精度来选择适当的量具，不能一味地提高度量精度，否则就会造成浪费。通常在加工一般精度的零件时，度量误差可占工件公差的1/5～1/10，而在加工精密零件时，度量误差可占工件公差的1/3左右。

对于大尺寸和精密零件的测量，温度引起的测量误差要特别注意。例如测量1m长的精密丝杠，由于温度升高1℃，螺距累积误差增大近10μm。因此测量工作要在标准恒温条件下进行，通过工件与量具放在一起经历一定的时间使被测工件与量具温度相等来达到。在进行精密测量时，还要注意体温的影响，特别是块规，人手拿着一段时间后会要伸长，需要放置一段

时间后尺寸才能复原。有时为了防止人体温度的影响，不许用手直接接触量具。

工序间的检验，通常不对刚从机床上卸下的工件立即进行，而应让工件冷却后再进行检验，以消除工件受热变形所引起的测量误差。

为了尽量避免由于测量力、人体温度和读数判断等主观性因素对度量精度的影响，在大批大量生产时，通常采用自动测量，以提高测量结果的客观性。

第三节　加工总误差的分析计算

第二节里对影响加工精度的各种因素进行了具体分析，建立了某些原始误差与加工误差间对应的数学关系，这为运用分析计算法求解加工总误差奠定了基础。同时，这些分析还为找出加工中存在的问题，控制与排除不利因素，保证加工精度，提高生产率，从理论上指出了方向。为了求出加工的总误差，首先要找出存在于加工工艺过程（或工序）中一切可能影响加工精度的工艺因素；其次是通过计算或按经验给定单项误差的具体数值；再次乃是对各项加工误差的性质进行分析；最后，根据不同性质的误差，采用不同的综合方法，把各个单项加工误差合成为加工总误差。下面只研究后面两项的内容。

一、加工误差的性质

区分加工误差的性质是正确合成加工总误差的一个重要环节。根据加工一批工件时误差的出现规律，加工误差可分为两大类：即系统性误差和随机性误差。

1． 系统性误差　在依次加工一批工件时，各工件上的误差大小和方向基本保持不变或误差随着加工时间按一定的规律变化，这类误差称为系统性误差。前者称为常值系统性误差，后者称为变值系统性误差。

常值系统性误差包括：加工原理误差，机床、夹具、量具制造误差与磨损，刀具制造误差等。在同一批零件的加工中，它们对每一个零件的影响是不变的，它们对加工精度的影响，可以事先估计或计算出来。例如铰刀直径尺寸小于规定的直径尺寸0.02mm，则所有铰出的孔直径都比规定尺寸小0.02mm，这就是常值系统性误差。

变值系统性误差包括：工艺系统的热变形误差、刀具磨损误差等。机床、刀具未达到热平衡时的热变形过程所引起的加工误差，是随加工时间而有规律地变化的，故属变值系统性误差；当达到热平衡后，可作为常值系统性误差。刀具磨损所引起加工误差的性质，可根据它在一次调整中的磨损量大小来判别。对于砂轮、车刀、端铣刀、单刃镗刀等均应作为变值系统性误差处理，例如车削光轴时，由于车刀的磨损，车削出来轴的直径就一个比一个大，而各轴直径的增大是随加工时间按一定规律变化的。对于钻头、铰刀、齿轮加工刀具等由于磨损所引起的加工误差在一次调整中很不显著，这时便应作为常值系统性误差处理。

2． 随机性误差　在依次加工一批工件时，误差出现的大小或方向作不规则地变化，这类误差称为随机性误差。例如毛坯的形状误差以及其硬度不均匀所造成的复映误差，工件内应力重新分布所引起的误差，工件的定位误差等均属于随机性误差。

工艺系统的刚度，虽是一个定值，但由于工艺系统刚度不足所造成的变形，还与切削力有关，而切削力的大小又随工件材料、余量大小不同而变化，这些因素的变化在一批工件中并无规律，因此工艺系统刚度不足而造成的误差，也常表现为随机性误差。

此外，对于同一误差，在不同的场合下可表现为不同的性质。例如调整误差，对一次调

整加工的那一批工件来说是常值系统性误差；若用多次调整所加工的一批工件，其调整误差则属随机性误差，因为每一次由工人调整时所造成的调整误差是变化的、不定的和没有规律的。又如度量误差，若仅从量具制造、调整、磨损而引起的误差而言，是属于系统性误差；测量过程中的读数、度量位置的不正确、测量力不均等所引起的误差则属于随机性误差。再如夹紧误差，一般应按随机性误差处理，但机动夹紧装置则在一定条件下又可作为常值系统性误差处理。

对于那些由于目前工艺水平限制而认识不到或考察不清的误差因素，一般均按随机性误差处理。

二、加工误差的合成

上述各项加工误差，由于其误差性质不同，在进行综合的时候，需要用不同的方法，应遵守下列规则（下列式中，cx—常系；bx—变系；sj—随机；zh—总）：

1． p个常值系统性误差相加，应取其代数和（考虑正负号，可以相互抵消），即

$$\Delta_{cx}=\Delta_{cx1}+\Delta_{cx2}+\cdots+\Delta_{cxp} \qquad (2\text{-}21)$$

2． i个随时间而变化的变值系统性误差相加，应取其时间函数值的代数和，即

$$\Delta_{bx}=\Delta_{bx1}(t)+\Delta_{bx2}(t)+\cdots+\Delta_{bxi}(t) \qquad (2\text{-}22)$$

3． n个随机性误差之和应按均方根偏差方法计算，即

$$\sigma_{sj}=\sqrt{\sigma_{sj1}^2+\sigma_{sj2}^2+\cdots+\sigma_{sjn}^2}$$

等式两边乘以6，则得

$$\Delta_{sj}=\sqrt{\Delta_{sj1}^2+\Delta_{sj2}^2+\cdots+\Delta_{sjn}^2} \qquad (2\text{-}23)$$

4． 系统性误差与随机性误差相加时，取它们的绝对值之和。

因此，各类误差的总和为

$$\Delta_{zh}=\Delta_{cx}+\Delta_{bx}+\Delta_{sj} \qquad (2\text{-}24)$$

如果采用调整机床、刀具等措施，消除Δ_{cx}对加工精度的影响，则

$$\Delta_{zh}=\Delta_{bx}+\Delta_{sj}$$

为了使加工后的工件合格，必须使工件加工的总误差小于工件的公差，即

$$\Delta_{zh}\leqslant T_w$$

必须指出，用分析计算法来求解零件加工误差，从理论上来说还有一些问题要继续研究，有些数据仍需实验测定，并且计算比较麻烦；对于各种不同的加工零件与方法，影响加工精度的各项因素，不一定同时存在，在某些条件下，只有几项因素起主导作用，其它因素的影响可以忽略不计。现以单件生产条件下，车削ϕ150mm，长2000mm的光轴为例进行说明，如图2-40所示。图中(a)只考虑了引起工件加工误差的几项主要因素：工艺系统弹性变形引起的误差（曲线1）；刀具磨损引起的误差（曲线2）；刀具热变形引起的误差（曲线5）以及机床本身存在的几何误差（曲线3）。这几项误差按代数和合成后，便得出了工件纵向几何形状误差曲线4。图中（b）为加工后所得光轴的形状。从图中可以看出：车刀的热伸长影响很大，起了误差相互抵消的作用。

由于是单件生产，工艺系统的弹性变形是一个定值，故所有的误差应用代数和合成，图中只考虑了零件的纵向形状误差，横向截面的形状误差没有考虑。

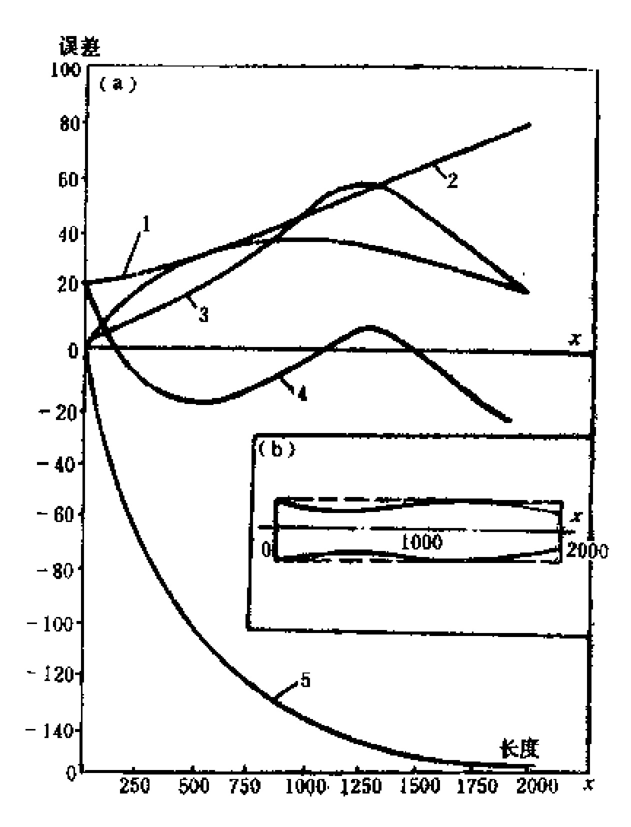


图2-40 加工光轴时误差的合成图解

1—弹性变形误差；2—刀具磨损误差；3—机床几何误差；4—工件纵向形状误差；5—刀具热变形误差

第四节 加工误差的统计分析法

在前面已研究了用分析计算法来求解加工总误差，但由于加工总误差受多种复杂因素的综合影响，计算起来不仅工作量很大，且难以准确计算出某一工序的加工总误差。因此在实际生产中常用统计分析法。

统计分析法是以现场观察与实际测量所得的资料和数据为基础，应用概率论理论和统计学的原理，以确定一定加工条件下一批零件加工总误差的大小及其分布情况。这种方法不仅可以指出系统性误差的大小和方向，同时还可指出各种随机性误差因素对加工精度的综合影响。运用统计分析法可以找出解决加工精度问题的途径。还能控制工艺过程的正常进行，统计分析法是全面质量管理（TQC）的主要基础。由于这种统计分析方法是建立在对大量实测数据统计的基础上，故一般只能用于调整法加工的成批、大量生产之中。

在机械加工中，常用的统计分析法主要有两种：分布图分析法和点图分析法。

一、分布图分析法

现以内燃机的气门挺杆(底带空心筒形)的外圆磨削为例。气门挺杆外圆尺寸精度要求为 $\phi25_{-0.025}^{-0.013}$mm，粗糙度为$Ra0.4$，在加工中要经过三次无心磨削。经过调整进行最后精磨时连续加工出100个工件，然后用0.001mm的比较仪测量。测得各个工件的实际尺寸按0.001mm的“尺寸间隔”分成10组，每一组中工件的尺寸处于一定的间隔范围。分别统计各组的工件数，并计算各组工件数与工件总数之比（以百分比表示，称为“频率比”或“出现率”），就可以得到表2-4的结果。

按照表2-4的数据，以工件的尺寸为横坐标，并将横坐标按尺寸间隔0.001mm予以等分，以每个尺寸间隔内的工件频率比为纵坐标，即可绘制出直方图，如图2-41所示。再将

表2-4　工件加工尺寸统计表

序　　号	尺寸间隔（mm）	分组算术平均值	工件数目	频率比（%）
1	24.976～24.977	24.9765	1	1
2	24.977～24.978	24.9775	4	4
3	24.978～24.979	24.9785	9	9
4	24.979～24.980	24.9795	15	15
5	24.980～24.981	24.9805	19	19
6	24.981～24.982	24.9815	22	22
7	24.982～24.983	24.9825	14	14
8	24.983～24.984	24.9835	0	10
9	24.984～24.985	24.9845	4	4
10	24.985～24.986	24.9855	2	2
		总算术平均值24.981	100	100

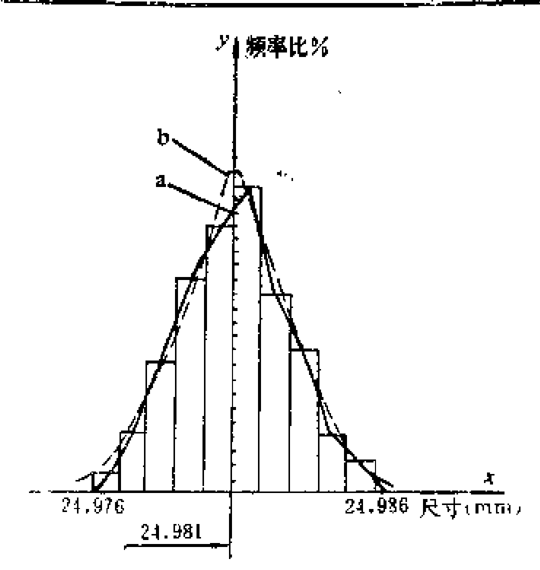


图2-41　尺寸分布直方图、折线图和曲线图

直方图顶边的中点依次联接起来，便得出尺寸分布折线图，如图中实线a所示。

当一批工件数目很多和尺寸间隔取得很小（即组数分得很多）时，折线图便非常接近曲线图，即尺寸分布曲线，如图2-41中虚线b所示。一般在没有某种重大因素影响的情况下，在机床上用调整法加工出来的一批工件，所得到的尺寸分布曲线与图2-41中的b曲线相似，即为正态分布曲线。

在《概率与统计》课程中，有关正态分布的问题已作过详述，在这里只简短回顾一下，并说明它在工艺上的应用。

正态分布曲线的函数表达式是

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \qquad (2-25)$$

决定分布曲线位置和形状的参数（称为特征数）是工件尺寸的平均值$\bar{x}$和标准偏差σ

$$\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i \quad , \quad \sigma=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2} \qquad (2-26)$$

式中　x_i　　第i个工件的尺寸；

　　　N　　整批工件总数。

由于整批工件数量较多，计算工作量大，可通过样本（总体的一部分）来了解总体，特征数可按下式计算

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \qquad (2-27)$$

式中　n　　样本容量（样本的工件数），

　　　　　　一般可取$n=30\sim100$件。

工件的加工服从正态分布规律时，有下列特性：

1．平均值$\bar{x}$是分布曲线的聚集中心。它决定分布曲线的位置。当σ保持不变而使$\bar{x}$发生变化时，则曲线沿x轴平移而不改变其形状，如图2-42（a）所示。$\bar{x}$的变化主要受常值系统性误差的支配。

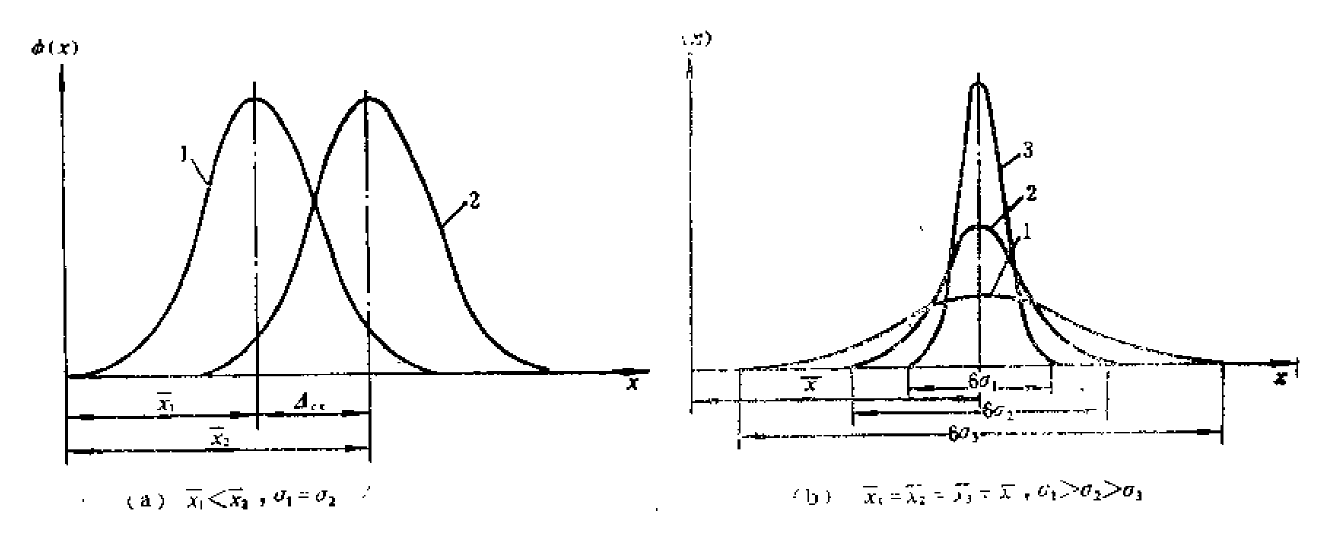


图2-42　$\bar{x}$、σ值对正态分布曲线的影响

（a）$\bar{x}$值对正态分布曲线的影响；　　（b）σ值对正态分布曲线的影响

2．标准偏差σ决定尺寸分散范围Δ（一般等于6σ）当$\bar{x}$保持不变，若σ愈小，则曲线形状陡峭，Δ也愈小；反之，σ愈大，则曲线形状平坦，Δ也愈大，则图2-42（b）所示。σ值是由随机性误差决定的，随机性误差越大则σ也越大。

3．分布曲线与横坐标在一定尺寸区间内所包围的面积就是该尺寸范围内工件出现的概率。

平均值$\bar{x}=0$、标准偏差$\sigma=1$的正态分布称为标准正态分布，其概率密度函数公式为

$$f(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{z^2}{2}} \tag{2-28}$$

随机误差出现在0到z区间的概率就是这一区间内正态分布曲线与横坐标之间所包含的面积，即

$$\Phi(z)=\int_0^z f(z)\mathrm{d}z=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}}\mathrm{d}z \tag{2-29}$$

$\Phi(z)$之数值已制成表格，如表2-5所示。

对于非标准正态分布，曲线下的面积Q（图2-43中的阴影部分）的计算，只需令$z=\frac{x-\bar{x}}{\sigma}$，将其变为标准正态分布，便可从表2-5中查出。

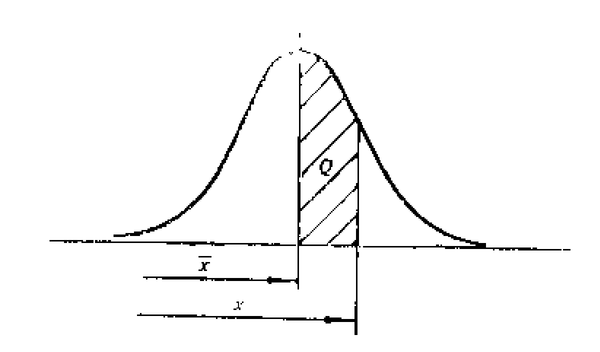


图2-43 曲线下面积Q表示该尺寸范围零件的概率

表2-5 $\Phi(z)$之值

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0.00	0.0000	0.20	0.0793	0.60	0.2257	1.00	0.3413	2.00	0.4772
0.01	0.0040	0.22	0.0871	0.62	0.2324	1.05	0.3531	2.10	0.4821
0.02	0.0080	0.24	0.0948	0.64	0.2389	1.10	0.3643	2.20	0.4861
0.03	0.0120	0.26	0.1023	0.66	0.2454	1.15	0.3749	2.30	0.4893
0.04	0.0160	0.28	0.1103	0.68	0.2517	1.20	0.3849	2.40	0.4918
0.05	0.0190	0.30	0.1179	0.70	0.2580	1.25	0.3944	2.50	0.4938
0.06	0.0230	0.32	0.1255	0.72	0.2642	1.30	0.4032	2.60	0.4953
0.07	0.0279	0.34	0.1331	0.74	0.2703	1.35	0.4115	2.70	0.4965
0.08	0.0319	0.36	0.1406	0.76	0.2764	1.40	0.4192	2.80	0.4974
0.09	0.0359	0.38	0.1480	0.78	0.2823	1.45	0.4265	2.90	0.4981
0.10	0.0398	0.40	0.1554	0.80	0.2881	1.50	0.4332	3.00	0.49865
0.11	0.0438	0.42	0.1628	0.82	0.2939	1.55	0.4394	3.20	0.49931
0.12	0.0478	0.44	0.1700	0.84	0.2995	1.60	0.4452	3.40	0.49966
0.13	0.0517	0.46	0.1772	0.86	0.3051	1.65	0.4505	3.60	0.499841
0.14	0.0557	0.48	0.1814	0.88	0.3106	1.70	0.4554	3.80	0.499928
0.15	0.0596	0.50	0.1915	0.90	0.3159	1.75	0.4599	4.00	0.499968
0.16	0.0636	0.52	0.1985	0.92	0.3212	1.80	0.4641	4.50	0.499997
0.17	0.0675	0.54	0.2004	0.94	0.3264	1.85	0.4678	5.00	0.49999997
0.18	0.0714	0.56	0.2123	0.96	0.3315	1.90	0.4713	—	—
0.19	0.0753	0.58	0.2190	0.98	0.3365	1.95	0.4744	—	—

从表2-5中可知，当$z=3$，即

$$|x-\bar{x}|=3\sigma时$$

$$\Phi(z)=0.49875$$

$$2\Phi(z)=0.9973$$

这就是说，尺寸在$\bar{x}\pm3\sigma$范围内的工件占全部工件的99.73%。

因此，工件加工尺寸属正态分布的情况下，可以近似地将$\pm3\sigma$范围看作是工件尺寸分布范围Δ，亦即取$\Delta=6\sigma$，而工件的极限尺寸为$\bar{x}\pm3\sigma$。

当工件公差$T_w\geqslant6\sigma$时，不会产生废品。但是，实际上机床调整时不可能没有常值系统性误差，这就势必造成分布曲线中心对公差带T_w中心位置的偏移，带来一定数量的废品。如果常值系统性误差为Δ_{cx},则不产生废品的条件为$T_w\geqslant(6\sigma+\Delta_{cx})$。但是在实际生产中，往往会遇到公差带小于工件尺寸分布范围的情况，这时不可避免地要产生废品。

正态分布曲线在机械加工中的应用有以下五个方面：

1. 用来判别加工误差的性质　若加工过程中没有变值系统性误差，那末其尺寸分布应服从正态分布；如果实际分布与正态分布基本相符，说明加工过程中没有变值系统性误差（或影响很小）。如果分布曲线的聚集中心$\bar{x}$与公差带中心重合，则说明不存在常值系统性误差；反之，如不重合，就说明存在常值系统性误差。

2. 用来制订典型工序的加工精度标准　在大批、大量生产中，对一些典型的加工方法进行前面所述的统计分析后，以那些资料（σ）为依据,可以制订出该工厂各种典型工序的加工精度标准（6σ）。

3. 应用分布曲线可以对两种加工方案的精度高低进行比较或研究某一因素对加工精度的影响比较的方法是分别用两种加工方法加工两批零件，或用同一方法而只改变所研究的因素，然后测量此两批零件的尺寸，画出分布曲线。根据求出的σ值的大小，便可判断其结果。

4. 判断某工序的工艺能力能否满足加工精度要求　所谓工艺能力是指处于控制状态的加工工艺所能加工出产品质量的实际能力，通常用该工序的尺寸分散范围来表示。大多数加工工艺的尺寸分布都接近于正态分布，故一般都取工艺能力为6σ。

判断工艺能力能否满足加工精度要求，只要把工件规定的加工公差T_w与工艺能力6σ作比较就可得出。T_w与6σ的比值以C_p表示,即$C_p=T_w/6\sigma$。C_p称为工艺能力系数,或叫工程能力指数、工序能力系数。C_p值的大小反映了工艺能力能够满足产品精度的程度。

（1） 若$C_p\geqslant1$，可以认为该工序具有不出废品的必要条件。如果这时出现了废品，主要是由常值系统性误差引起的，只要重新调整工艺系统，清除常值系统性误差，或在相反的方向上用一常值系统性误差Δ_{cx}去抵消原有的常值系统性误差，将平均尺寸$\bar{x}_0$变为$\bar{x}_1$，使聚集中心与公差带中心重合，如图2-44（a）就可以防止废品的出现。

（2） 若$C_p<1$，那末不论怎样调整，均不能避免废品的出现。这时，必须查明尺寸分散范围增大的原因，采取措施减少随机性误差。如一时无法消减误差，则应适当调整聚集中心位置，使聚集中心与公差中心重合〔$\bar{x}_1=(x_{max}-x_{min})/2$〕，如图2-44（b）曲线1,这时产生的废品可最少。也可通过控制使不产生不可修复的废品（工件的尺寸向入体方向超差，就成为不可修复的废品）。以孔加工为例，可调整到$\bar{x}_2=x_{max}-3\sigma$，如图2-44（b）曲线2。不过这种方法使返修率增多，经济上并不合算，故很少采用。

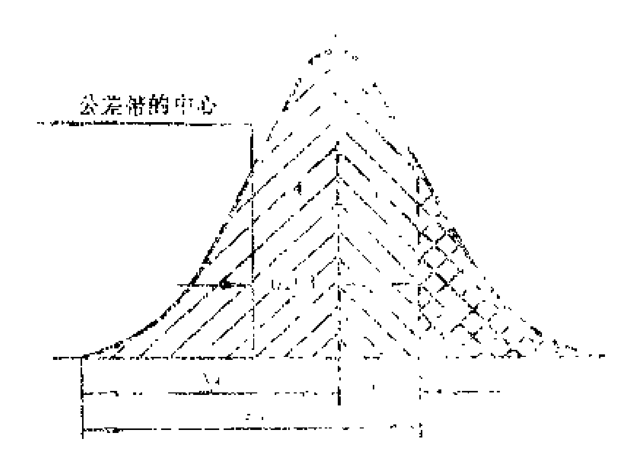


图2-45 公差带不对应于分布曲线中心

由于
$$z=\frac{|x-\bar{x}|}{\sigma}$$

故
$$z_A=\frac{|x-\bar{x}|}{\sigma}=\frac{x_A}{\sigma}=\frac{0.5\delta+0.03}{\sigma}=\frac{0.05+0.03}{0.025}=3.2$$

$$z_B=\frac{|x-\bar{x}|}{\sigma}=\frac{x_B}{\sigma}=\frac{0.5\delta-0.03}{\sigma}=\frac{0.05-0.03}{0.025}=0.8$$

查表2-5得

当$z_A=3.2$时，　$\Phi(z_A)=0.49931$

当$z_B=0.8$时，　$\Phi(z_B)=0.2881$

故零件的合格品率为

$$0.49931+0.2881=0.78741=78.741\%$$

不可修复的废品率为

$$0.5-\Phi(z_A)=0.5-0.49931=0.00069=0.069\%$$

可修复的废品率为

$$0.5-\Phi(z_B)=0.5-0.2881=0.2119=21.19\%$$

在机械加工中，有时也会出现工件实际尺寸的分布曲线与正态分布曲线有较大出入的情况。例如用试切法加工时，由于操作者主观上不愿产生不可修复的废品，所以在加工轴时存在宁大勿小，在加工孔时存在宁小勿大的情况。零件的尺寸受操作者主观上存在着宁可返修不要报废的倾向性的影响，此时加工出来的工件分布曲线往往是不对称的，如图 2-46（a）、（b）所示。在加工时，当工艺系统存有较显著的热变形影响时，由于热变形在开始阶段变化较快，以后逐渐减慢，直至热平衡状态，故其分布曲线的形状，也与试切法相似，出现了不对称状态，如图 2-46（c）所示。当刀具或砂轮磨损显著时，尽管在加工的每一瞬间，工件的尺寸可能按正态分布，但随着刀具或砂轮的磨损不同瞬间的尺寸分布中心是随时间逐渐移动的，亦即在随机性误差中混有变值系统性误差，故工件的实际分布曲线出现平顶，如图 2-46（d）所示。若将两次调整下加工的工件混在一起，由于每次调整时常值系统性误差不同，如常值系统性误差之差值大于2.2σ时其分布曲线将是双峰曲线，它是两组正态分布曲线的叠加，亦即在随机性误差中混入了常值系统性误差。假使把两台机床加工的工件混在一

起，不仅调整时常值系统性误差不等，机床的精度也不同（随机性误差的影响也不同），故叠加曲线的两个高峰也不相同如图2-46(e)所示。此外，对于没有正负之分的形位误差，例如端面跳动、径向跳动等误差，尽管仍服从正态分布规律，但因误差没有负值，故分布曲线的左边部分被加到右边部分上去了，呈不对称的形状，如图2-46（f）所示。

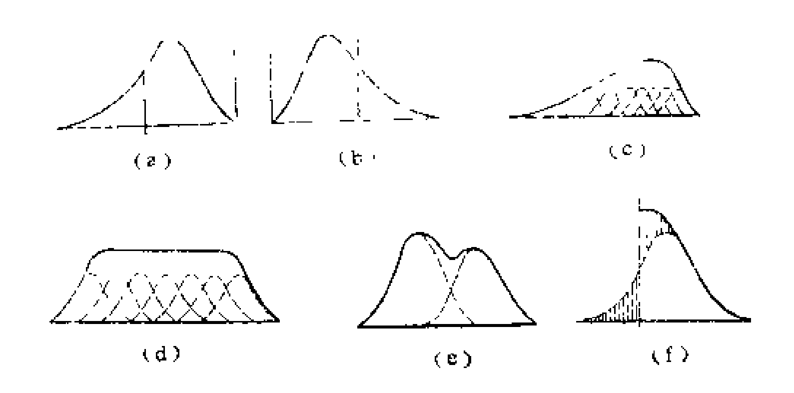


图2-46　几种具有明显特征的分布曲线

（a）轴径误差分布；（b）孔径误差分布；（c）热变形显著时尺寸误差分布；（d）刀具磨损显著时尺寸误差分布；（e）双峰分布；（f）工件几何形状误差分布

对于非正态分布的分散范围，就不能象正态分布那样，认为是6σ（$\pm 3\sigma$），而必须除以相对分布系数k，即为$6\sigma/k$。k值的大小与分布的图形有关。这个问题在"自动武器尺寸链"课程中已详述，此处从略。

采用分布图分析加工误差存在下列主要缺点：

1. 加工中随机性误差和系统性误差是同时存在的，由于分析时没有考虑到工件加工的先后顺序，故不能反映出误差的变化趋势，因此也很难把随机性误差与变值系统性误差清楚地区分开来。

2. 必须等一批工件加工完毕后才能得出分布情况，因此不能在加工过程中及时提供控制精度的资料。

二、点图分析法

点图又叫控制图，或称管理图。它是用来控制加工质量随时间发生波动的图表，是分析工序是否处于稳定状态，以及保持工序处于控制状态的有效工具。点图是在分布图法的基础上发展起来的，它实质上是按工件顺序分解了的分布图，它克服了分布图法的缺点，由于它按加工顺序记录出工件的尺寸变化情况，故能揭示出整个加工过程误差变化的全貌。

控制图的基本格式如图2-47所示，它由三条具有统计意义的控制线（上控制线UCL、下控制线LCL和中心线CL）和一条质量特征值波动曲线组成。

在加工过程中，定期地随意地抽取样本，测出各个样本的尺寸，把测得的数据用点描绘在控制图上，用来判断工序状态。如果点波动于控制线内，则表明工序处于控制状态；如果点波动于控制线外，则表示工序发生异常，可能将出现废品，应当采取措施使加工过程恢复正常。其主要作用有两个：其一是分析工序，即分析工艺过程是否稳定。为此，应随机地收集数据，绘制点图，观察和评定工序状态。其二是控制工序质量，即当发现异常情况时，及时采取措施，消除加工过程中的失常状态，预防废品的产生。

点图（控制图）的形式很多，有计量值点图和计数值点图。最常用的是计量值点图中的平

均值-极差点图（$\bar{x}$-R控制图）以及计数值点图中的不合格品数点图（pn控制图）和缺陷数点图（C控制图）。由于这些点图基本原理相同，作法也相似，所以在这里只讨论$\bar{x}$-R控制图。

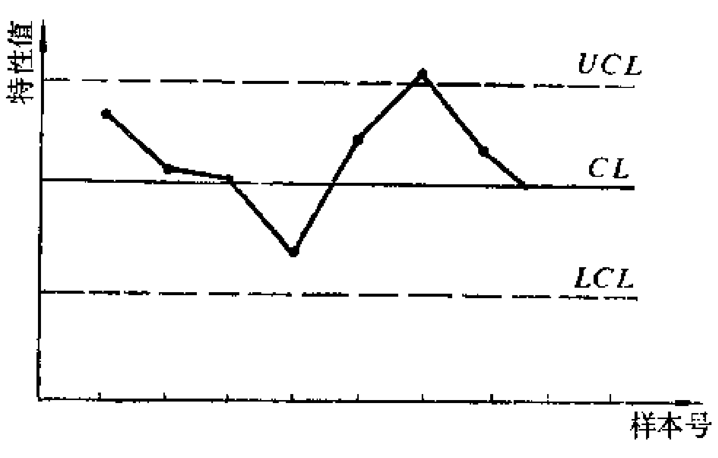


图2-47　控制图格式

$\bar{x}$-R控制图，是平均值控制图和极差控制图的结合。由于$\bar{x}$在一定程度上代表了瞬时的分散中心，故$\bar{x}$控制图主要反映系统性误差及其变化趋势。R在一定程度上代表了瞬时的尺寸分散范围，故R控制图可反映出随机性误差及其变化趋势。单独的$\bar{x}$控制图或R控制图不能全面地反映加工误差的情况，因此必须把这两种控制图结合起来使用。

下面研究控制图的绘制方法及对其观察与分析要注意的一些问题。

1．$\bar{x}$-R控制图的绘制

绘制控制图，主要是确定各控制线，其方法是：

（1）　作好准备工作　将机床以及加工用的各种工、夹、量具调整好，使工艺系统处于正常状态。

（2）　收集样本数据　按照加工时间的顺序，在一定时间间隔生产的产品中，随机地抽取样本，每个样本的容量为4～5件，检验其质量，将其数据填入按样本号次序编排的有关表格中。样本的总容量一般不少于100件，以保证有较好的代表性。

（3）　计算样本的平均值$\bar{x}$及极差R

$$\bar{x}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}x_i \quad ,$$

$$R=\max\{x_1, x_2\cdots x_m\}-\min\{x_1, x_2\cdots x_m\}$$

式中　m——样本容量（一个样本所含工件的件数）；

x_i——一个样本中第i个工件的尺寸；

$\max\{x_1, x_2\cdots x_m\}$、$\min\{x_1, x_2\cdots x_m\}$——一个样本中各工件的最大、最小尺寸。

（4）　计算各个样本平均值的平均值$\bar{\bar{x}}$和各个样本极差的平均值$\bar{R}$

$$\bar{\bar{x}}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\bar{x}_i \ , \quad \bar{R}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}R_i$$

式中 k——样本总数。

（5） 确定控制线

$\bar{x}$控制图 中心线$CL=\bar{\bar{x}}$

上控制线$UCL=\bar{\bar{x}}+A_2\bar{R}$

下控制线$LCL=\bar{\bar{x}}-A_2\bar{R}$

R控制图 中心线$CL=\bar{R}$

上控制线$UCL=D_4\bar{R}$

下控制线$LCL=D_3\bar{R}$

式中A_2、D_4、D_3的数值可按表2-7选取。

表2-7 确定控制线系数表

样本容量n	4	5	6
A_2	0.729	0.576	0.484
D_4	2.282	2.114	2.004
D_3	0	0	0

表中D_3为零，表示不用考虑R的下控制界限。

（6） 画图 在方格纸或控制图上，用$\bar{x}$和R的标尺画出纵坐标，以样本号的单位画横坐标。中心线用实线，上下控制线用虚线，并标上CL、UCL及LCL和它们的数值。然后将各组的$\bar{x}$用圆点（·）R用叉号（×）画在图上，点与点之间用实线连接。同一样本号的$\bar{x}$及R点要画得上下对应。超出控制线的点，为了醒目起见可用⊙或⊗表示。

图2-48所示为磨削$\phi50^{-0.01}_{-0.06}$mm的轴径，按一定的时间间隔取样，每样组（本）为4件，共取25个样本（100件）所得的$\bar{x}$-R控制图。为了计算简便，图中$\bar{x}$采用基本尺寸50减去样本中每个实测尺寸的差数平均值。

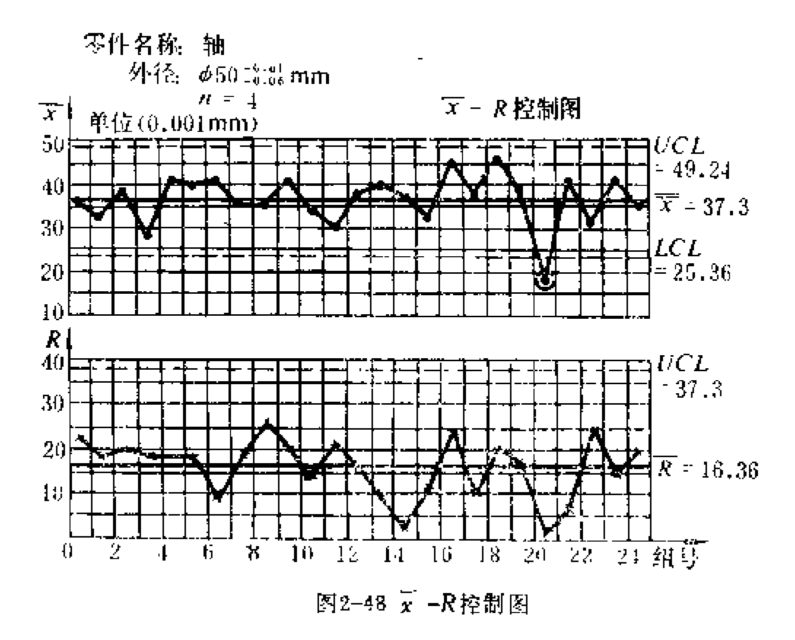


图2-48 $\bar{x}$－R控制图

2． $\bar{x}$-R控制图的观察分析

观察和分析工序质量控制图是为了找出有关工序状态的信息。当发现生产过程处于异常状态时，能尽早查明原因，采取措施，使生产过程迅速恢复正常，这样才能真正发挥控制图的效用，把产生不合格品的因素消灭在萌芽之中。

一般来说，控制图上的点反映出生产过程的稳定程度。工序处于控制状态时，控制图上的点处于正常波动状态，即：（1）没有点超出控制线；（2）大部分点在中心线上下随机地波动，而接近上下控制线的点就很少；（3）点没有明显的规律性。

当控制图上的点出现了下列异常波动情况时，表明工艺过程不正常，应停机检查和调整。

（1） 有一个或几个点超出控制线，而相邻几个点接近控制线时，说明工件尺寸可能已达公差带边缘，甚至已超差。这种现象出现在$\bar{x}$图上时表明系统性误差较大，如出现在R图上，则表明随机性误差较大。

（2） 有相当多的点，特别是相邻的点，均落在中心线以上或以下时，说明有常值系统性误差（出现在$\bar{x}$图上时），随机性误差大（出现在R图中心线以上时）或R图上控制限范围定得太宽（出现在R图中心线以下时）。

（3） 点有倾向性趋势时，说明规律性误差影响较大。例如，控制图中的点虽在控制线之内，但排列上有缺陷时，应判为工艺过程有异常变化（波动），如图2-49所示。图2-49（a）中点在中心线一侧连续出现7次以上；图2-49（b）中连续有7个以上的点上升或下降；图2-49（c）中点在中心线一侧多次出现，如连续11个点中至少有10个、连续14点中有12个、连续17个点中有14个点在中心线一侧；图2-49（d）中连续3点中有2点接近上或下控制线；图2-49（e）中点保持周期性变化。所有这些都说明有某种规律性因素在起作用，产生了异常状态。

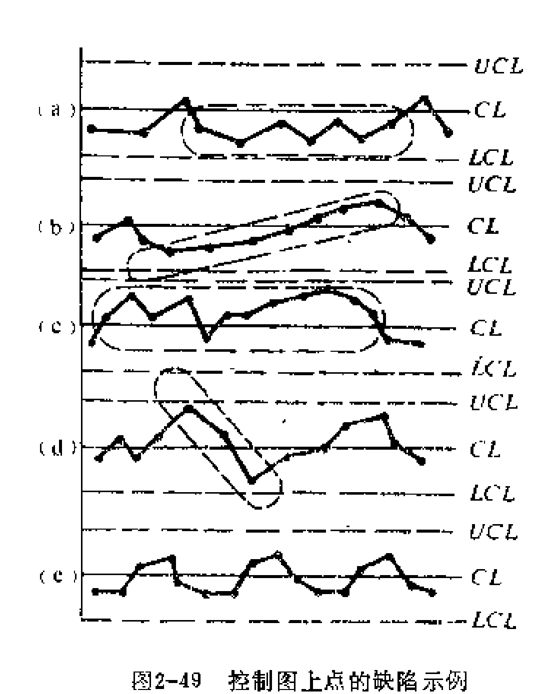


图2-49 控制图上点的缺陷示例

点图分析法是全面质量管理中用以控制产品加工质量的主要方法之一。它主要用于工艺验证（判断现行工艺或准备投产的新工艺能否稳定地满足产品质量要求）、分析加工误差和加工过程的质量控制，并且根据工件加工误差的变化趋势判断机床是否需要重新调整。

三、机床的调整

为了保证产品质量，避免废品的产生，应使分布图或点图位于图纸规定的公差带以内，这里除了是否有足够的工序能力外，还要使分布图或点图的上下位置合适，例如，要使分布

图的中心线尽量位于公差带的中央。对于尺寸刀具来说，是选择刀具尺寸大小的问题，而对一般刀具来说，就是机床的调整问题。

机床的调整可用静调整的方法，即做一个样件（形状与工件相同，但需淬硬后磨出，其尺寸可与工件相同或有定量差异），将刀尖调到正好碰到样件或离开一个固定的距离（用塞尺或厚薄规来检测）。但是由于工艺系统的受力变形等原因，用静调整法调好后加工出的工件其尺寸会有不小的误差，因而一般都要加工一个或数个工件，看工件的尺寸是否合格来确定调整是否合适。如何从一个或数个试加工的工件尺寸大小来估计整批工件（即母体）分布曲线的位置，从而确定调整是否合适，这就是下面所要讨论的机床调整问题。

1. 试加工一个工件的机床调整法　这种方法就是用调整好的机床，试加工一个工件，根据这个工件的加工尺寸来判断机床调整是否正确。采用这种方法来调整机床时，工件的公差$T_w \geqslant 6\sigma$是不够的，必须大于12σ。

若知工件的公差T_w等于尺寸分布范围$\bar{x} \pm 3\sigma$，即$T_w = 6\sigma$，如图2-50所示。由于试加工一个工件的尺寸落在公差T_w内的A点，而A点的工件尺寸是即将加工的一批工件的尺寸分布曲线上的任一点，在极限情况下可能是该批工件的最大尺寸或最小尺寸，故加工出来的全批工件尺寸将按曲线Ⅰ或Ⅱ分布。按曲线Ⅰ分布时，图右边打阴影线部分将为废品；按曲线Ⅱ分布时，图左边打阴影线部分将为废品。只有试加工工件的尺寸是即将加工的那批工件的分布曲线Ⅲ上的a点时，才能避免废品的发生。但是，在试加工工件时无法保证出现在公差范围内A点的工件尺寸就是未来全批工件分布曲线上a点的尺寸，因此不能保证不产生废品。

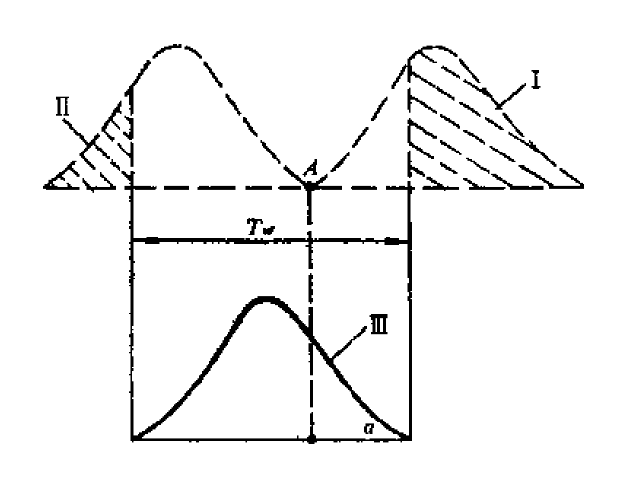


图2-50 试加工一个工件时可能的尺寸分布

只有当$T_w > 12\sigma$时，并且试加工工件的尺寸落在MN范围内（用调整量规控制），如图2-51所示，才能避免废品的产生。例如试加工的一个工件，其尺寸落在图中的A点，则此尺寸不论是将来全批工件尺寸分布曲线上的那一点，均能保证全批工件尺寸都是合格的。图中$MN = T_w - 12\sigma$。这个12σ中有6σ是该工序的加工误差，是由随机性误差引起的，还有6σ是调整误差，即由于只试加工一个工件所造成的估计误差。这个误差将来反映出来的是常值系统性误差。

用试加工一个工件来进行调整，虽然有其优点：试加工工件数目少，可以减少试加工时产生的废品，但它也有缺点：它要求$T_w > 12\sigma$，也就是说，只能用在$C_p > 2$的场合，即使是如此，MN的范围也很小，不便于调整；并且使得高精度机床只能用于干粗活，因此这种调

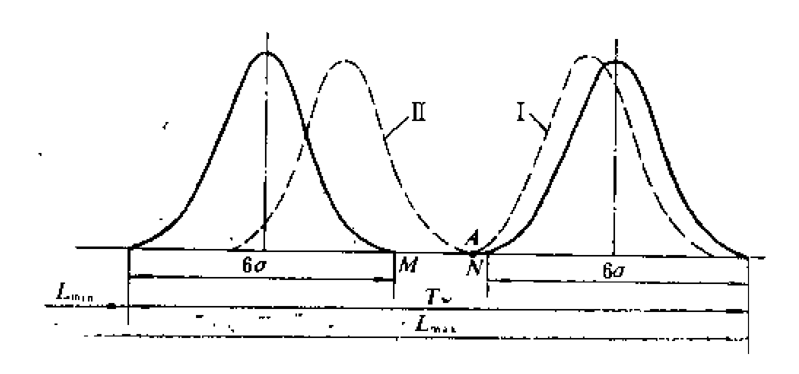


图2-51 试加工一个工件，按调整量规进行调整

整机床的方法用得较少。

2. 试加工几个工件，按其平均值的机床调整法　这种方法可以克服前一种方法的缺点，适用于$T_w<12\sigma$的情况，是较为常用的一种方法。当$T_w<12\sigma$时，整个公差范围已容不下两个分布曲线，部分地要重叠起来，前述的调整范围MN已不存在，故再用试加工一个工件来进行调整已成为不可能。因此必须创造新的如图2-52所示的调整范围$M'N'$。

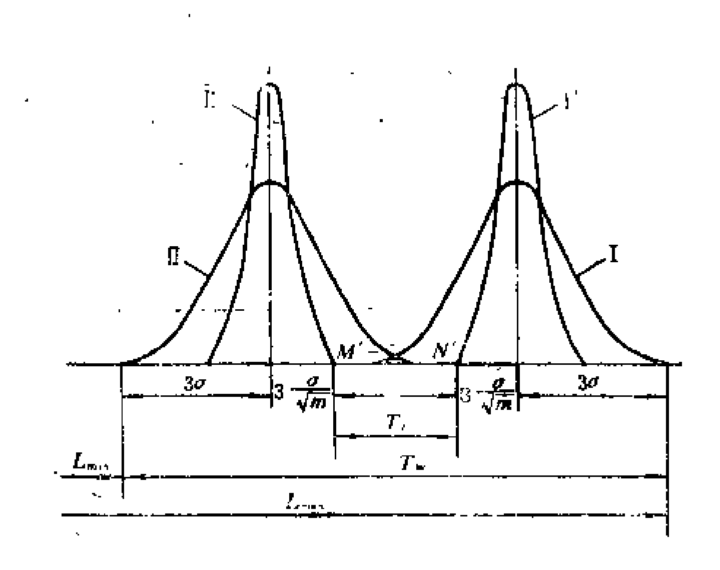


图2-52 试加工几个工件，用万能量具测其平均值进行调整

根据概率统计原理，如果从全批零件中任取出m个零件为一组，把全批零件分成许多组，计算出每组零件尺寸的平均值$\bar{x}$，根据这些平均值可以作出新的分布曲线，此曲线具有下列特性：其算术平均值与原来全批零件算术平均值相等（即分布中心重合），其标准偏差σ'，较全批零件标准偏差σ为小，关系为$\sigma'=\sigma/\sqrt{m}$。在图2-52中，曲线Ⅰ或Ⅱ为整批零件的分布曲线，而曲线Ⅰ'，Ⅱ'则是根据分组后各组算术平均值做出来的分布曲线。后者的分布范围比前者小。如果在调整机床时保证即将加工出的那批零件，其分组算术平均值分布曲线不超过Ⅰ'，Ⅱ'的位置，那末加工出来的全批零件尺寸也不会超过Ⅰ，Ⅱ的位置，也就是说在公差范围内没有废品产生，即机床调整合乎要求。

根据上述原理，生产中的具体做法是：机床调整好后，试加工m个工件，然后求m个工件加工尺寸的算术平均值，如果其平均值落在$M'N'$范围内，即说明调整是正确的。这时调整范围$M'N'$（即机床调整公差T_t）为

$$M'N' = T_t = T_w - 2\left(3\sigma + 3\frac{\sigma}{\sqrt{m}}\right) = T_w - 6\sigma\left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right) \tag{2-30}$$

从上式可以看出：工件的公差T_w越大，则调整范围也越大，故机床容易调整；如果调整范围一定时，σ越大，调整范围就越小，调整也就越困难；若m越大，调整范围也越大，越容易调整，但当m越大时，试加工可能产生的废品就越多，因此m不宜过大或过小，一般取$m=2\sim8$个。

从上式中还可以看出，6σ是加工误差，$6\sigma/\sqrt{m}$是调整误差。如$m=4$时，则调整误差为3σ，为试加工一件时的一半，这时$M'N'=T_w-9\sigma$。

在机械加工中，很多工序的工艺过程是不稳定的。例如在加工过程中刀具或砂轮的磨损明显、机床在未达到热平衡时的热变形影响较大且没有自动补偿装置时，都会引起变值系统性误差而导致加工工艺不稳定。对于不稳定的工艺过程的调整，不仅要保证整批工件的尺寸分散不超过公差带范围，而且还要求两次调整间能加工尽可能多的工件。因此不仅要考虑因随机性误差引起的尺寸分散，还要考虑工艺系统的热变形和刀具尺寸磨损等引起的变值系统性误差的影响。为此，需要根据以往的统计资料作出精度图。以外圆的车削加工为例，其精度图如图2-53（a）所示。图中的黑粗线代表尺寸平均值$\bar{x}$的变化规律，阴影部分代表各瞬间的分散范围（极差）。在开始加工时瞬时尺寸分散为$6\sigma_1$，随着刀具受热伸长而使工件尺寸缩小（变值系统性误差a），刀具接近热平衡温度后，其后又因刀具逐渐磨损而使工件尺寸增大（变值系统性误差b），与此同时，由于刀具磨钝引起切削力增大等原因，使瞬时尺寸分散增大为$6\sigma_2$。

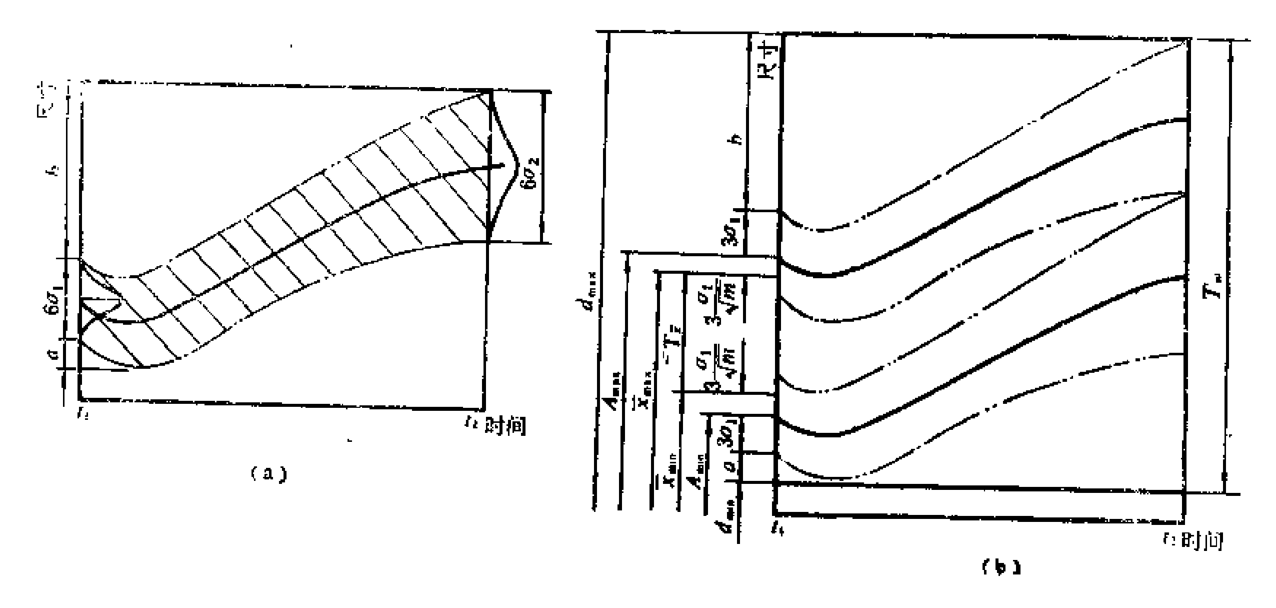


图2-53　外圆车削加工的精度图及机床调整图

如果工件的最大与最小直径为d_{max}与d_{min}，直径公差为T_w，如图2-53（b）所示，则保证在时间t_1到t_2之间不产生废品的条件是：必须使精度图处于图中两个极限位置之间，也就是使调整时分散中心处于下列范围之内

$$A_{max} = d_{max} - 3\sigma_1 - b$$

$$A_{min} = d_{min} + 3\sigma_1 + a$$

式中 A_{max}、A_{min}——瞬时分散中心的上下限；

σ_1——调整时（t_1）瞬时分布曲线的标准偏差；

a、b——变值系统性误差所引起的两个变动量。

由于瞬时分散中心的位置A是无法直接确定的，但可在调整之后，测量最初加工的几个工件，计算出它们的平均值$\bar{x}$，再利用$\bar{x}$来估计A的位置。由于测量的工件数m不可能太多（通常$m<10$），因此$\bar{x}$的位置还不能代表瞬时分散中心。但样组$\bar{x}$分布的中心与瞬时分散中心是重合的，而且$\bar{x}$分布的标准偏差$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma_1}{\sqrt{m}}$。因此，当$\bar{x}$测定以后，可以估计瞬时分散中心与它的差值不会超过$3\sigma_1/\sqrt{m}$。

为了保证调整后在t_1到t_2之间不产生废品，m个工件的平均尺寸$\bar{x}$必须处在下列两平均尺寸之间。

$$\bar{x}_{max}=A_{max}-\frac{3\sigma_1}{\sqrt{m}}$$

$$=d_{max}-b-3\sigma_1\left(1+\frac{1}{\sqrt{m}}\right) \tag{2-31}$$

$$\bar{x}_{min}=A_{min}+\frac{3\sigma_1}{\sqrt{m}}$$

$$=d_{min}+a+3\sigma_1\left(1+\frac{1}{\sqrt{m}}\right) \tag{2-32}$$

在调整时，试加工m个工件的尺寸平均值$\bar{x}$的公差$T_{\bar{x}}$（亦即调整公差T_t）为

$$T_{\bar{x}}=\bar{x}_{max}-\bar{x}_{min}$$

$$=T_w-a-b-6\sigma_1\left(1+\frac{1}{\sqrt{m}}\right)$$

换句话说，只有当工件公差

$$T_w>(a+b)+6\sigma_1\left(1+\frac{1}{\sqrt{m}}\right) \tag{2-33}$$

时，才有可能调整到不产生废品。

当T_w、σ_1、m相同时，不稳定的工艺过程的调整公差比稳定的工艺过程的调整公差要小，小一个（$a+b$）值，这就使得调整难度更大一些。

第五节 机械加工的经济精度

在机械加工过程中，由于影响加工精度的因素很多，不仅各种加工方法所能达到的加工精度范围不同，而且即使用同一种加工方法在不同的条件下所能达到的加工精度也会不一样。甚至在相同的条件下，采用同一种加工方法，而只是减低切削用量，多费一些工时细心地完成加工过程中的每一操作，就能大大地提高加工精度。不过，这样会降低生产率，提高产品

成本，因而是不经济的，也不符合对机械制造工艺过程所提出的质量、生产率和经济性的要求。

零件的加工成本（Q）与加工精度（用误差Δ表示）之间的关系如图2-54所示。从$Q=f(\Delta)$的图中可以看出，零件的加工成本按双曲线性质随精度的增加而升高。用同一种加工方法，要达到较高的精度，则成本要高些，反之，则成本降低。图中的曲线，可分为A、B、C三段，在A段中，曲线几乎与纵坐标平行，这时即使大大减小切削用量，提高加工费用，而精度的提高却很少，甚至不能提高（图中Δ_a是该种加工方法所特有的误差，是不能使其降低的）。相反地，在C段中，曲线几乎与横坐标平行，即用某种加工方法加工精度很低的工件，但加工费用并不会因精度很低而无限制地降低。在B段中，精度与成本近似的反比例关系比较明显，增加加工时间（即增加成本），能使加工精度显著地提高。相当A段的精度范围（Δ_a），称为某种加工方法可能达到的精度；相当C段的精度范围（大于图中$\Delta_a+\Delta_b$），称为某种加工方法能保证的精度（指在最不利的条件下所能保证的精度）；相当B段的精度范围（$\Delta_a\sim\Delta_a+\Delta_b$），称为某种加工方法的经济精度。显然，某种加工方法只有以经济精度的加工范围用来进行加工才是合理的，以可能的或能保证的精度来进行加工，则是不合理的，不经济的。例如在车床上加工IT7级精度的轴，花更多的时间，是可以加工出来的，IT7级精度是车加工可能达到的精度。这时不仅成本高，同时工作不稳定，且容易产生废品，因而是不经济的。又如在磨床上加工精度很低的工件，很容易达到所要求的精度，保证不出废品，但加工费用不能降低，与车削加工相比，费用高，同样是不经济的。一种加工方法，只在一定精度范围内才是经济的；每种加工方法都有自己的经济精度；经济精度的具体范围确定是比较困难的，只有在与其它加工方法相比较后才能得出。

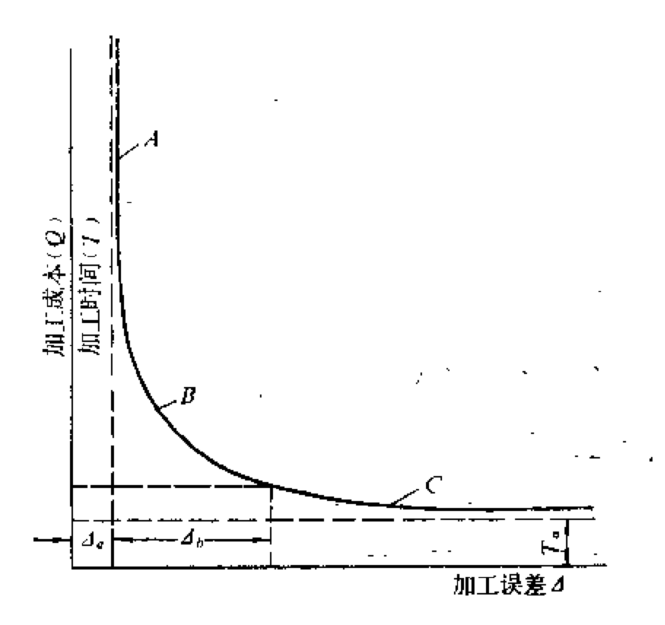


图2-54　加工成本与加工精度（加工误差）之间的关系

图2-55所示为三种加工方法的加工精度与加工成本的关系曲线。图中方法Ⅰ最粗，方法Ⅱ较精，方法Ⅲ最精。当零件的尺寸公差$T>\Delta_1$时，方法Ⅰ的加工成本最低，用方法Ⅰ较合适；当零件的尺寸公差$T<\Delta_2$时，用方法Ⅲ较合适，既能保证加工精度，且其成本也较方法Ⅱ为低；当零件的尺寸公差T在$\Delta_1\sim\Delta_2$之间时，采用方法Ⅱ，能使加工成本最低，也就是说加工误差$\Delta_1\sim\Delta_2$这个范围称为第Ⅱ种加工方法的经济精度。

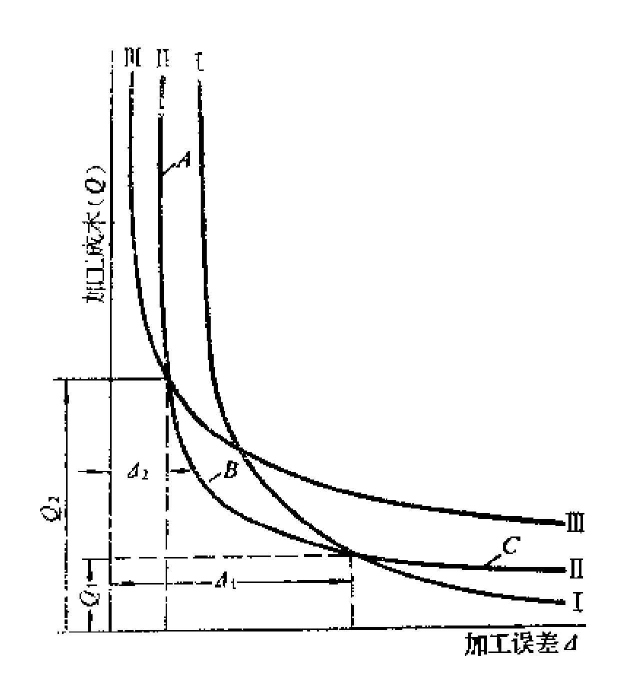


图2-55　不同加工方法的加工成本与加工误差的关系

综上所述，经济加工精度是利用完好的设备，适当质量的夹具和标准刀具，由一定熟练程度的工人操作，按照标准的切削用量和工时定额，且其加工费用不超过其他加工方法等正常条件下所得到的加工精度。

经济加工精度在机械加工的有关手册中均可查到。这些资料是在某一段时间内，按许多加工精度的统计资料综合归纳而成。经济加工精度随着生产技术水平的提高，设备工装条件的改善，以及工人的创造与革新，都会不断地得到提高，因此它并不是一个固定不变的数值。此外，由于各个地区、工厂的具体生产条件不同，经济加工精度也是在一定范围内变动的。手册上查到的各种加工方法的经济加工精度实际上是一个平均值，即平均经济加工精度，简称经济精度。在应用这些资料时，应结合具体的生产条件，作一些必要的修正，以使其更符合本单位的生产实际。

第三章　机械加工的表面质量

第一节　概　述

零件的加工质量除了加工精度以外，还包括零件在加工后的表面质量。表面质量包括两个方面的内容：

1．表面的微观几何形状，即表面粗糙度和波度；

2．表面层的机械物理性能，即表面层的加工硬化、金相组织变化和残余应力。

表面粗糙度是一种表面微观几何形状误差（图3-1）。表面粗糙度曾叫表面光洁度，它们是表面微观不平度同一问题的两种提法。表面粗糙度又分为纵向粗糙度（沿切削方向）和横向粗糙度（垂直于切削方向）。通常横向粗糙度的大小超过纵向粗糙度约2～3倍（为清晰起见，图中横向粗糙度采用斜向截形）。但对某些加工方法，特别是在出现较大的振动或表面金属塑性变形时，纵向粗糙度较大，例如用圆柱铣刀铣出的平面就是这样。表面微观轮廓形状，根据目前加工方法的实际情况，可分为三类：尖峰状轮廓〔图3-2(a)〕，一般机械加工后的表面大多具有这种形状；圆弧状轮廓〔图3-2(b)〕，化学与电化学加工后的表面大多具有这种形状；凹坑状轮廓〔图3-2(c)〕，电蚀加工后的表面大多具有这种形状。切削加工表面粗糙度主要是由切削过程中的刀痕、切屑分离时的塑性变形、积屑瘤、鳞刺以及工艺系统的高频振动等原因所造成的。

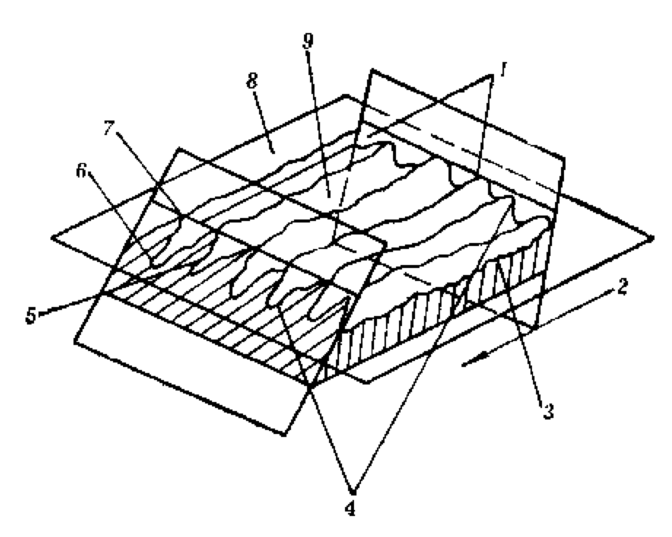


图3-1　表面粗糙度

1—几何轮廓；2—切削方向；3—纵向粗糙度；4—实际轮廓；
5—横向粗糙度；6—峰谷；7—峰顶；8—几何表面；9—实际表面

波度是介于零件的宏观几何形状误差〔其波距S（峰与峰或谷与谷间的距离）与波高H（峰、谷间的高度）之比大于1000时属宏观几何形状误差，它是加工精度研究的对象〕和微

观不平度(即表面粗糙度，这时$S/H<50$)之间的周期性几何形状误差，其$S/H=50\sim1000$，它属于表面质量范畴，主要是由加工过程中工艺系统的低频振动造成的。

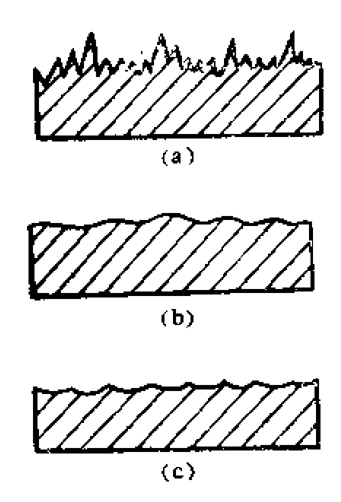


图3-2 表面的微观轮廓形状
(a)尖峰状轮廓；(b)圆弧状轮廓；(c)凹坑状轮廓

在切削过程中，由于切削力和切削热的作用，使工件的表面层金属具有与其内部金属不同的机械物理性能。表面层因塑性变形引起了加工硬化(又叫表面强化、冷作硬化)。以钢件为例，表面硬度平均值可达原工件硬度的1.2～2倍，硬化层厚度平均值可达0.02～0.2mm。表面层因切削热的影响，使其温度增加，当温度达到某一数值时，使加工表面层的硬度、强度降低，塑性增加。若温度很高，则会发生再结晶现象，使表面强化完全消除，这种现象叫做弱化。在磨削加工中，由于磨削温度高，常常引起淬火钢的马氏体组织分解，从而引起表面层金相组织的变化，出现回火组织，或出现二次淬火等等。在表面层出现冷作硬化或者随着表面层金属组织变化的同时，必然会产生表面层的残余应力，有时为残余拉应力，有时为残余压应力。

机械产品的工作性能，尤其是工作的可靠性和使用寿命，在很大程度上取决于主要零件的表面质量。零件的使用性能，如耐磨性、疲劳强度、耐腐蚀性等等除与材料本身的性质和热处理有关外，还取决于加工后的表面质量。所以零件加工后的表面质量是零件机械加工质量的一个重要方面。

研究机械加工表面质量的目的，在于了解表面质量对机械产品及零件使用性能的影响，熟悉影响表面质量的各种工艺因素，懂得控制与提高表面质量的方法和途径，对生产中出现的有关表面质量问题，能进行分析，提出解决的办法，以保证零件和产品的制造质量。

第二节 表面质量对零件和产品使用性能的影响

零件的表面质量，不仅影响零件的使用性能，同时也影响整个产品的使用性能。例如机械产品工作时的高效率、可靠性和使用寿命以及零件的强度、接触刚度、耐磨性和耐腐蚀性等等均与零件的表面质量有关。对自动武器来说，表面质量直接影响武器的射击精度、射击频率、工作可靠性和武器的寿命。自动武器的枪管，其线膛表面不仅要求具有较小的表面粗糙度，同时还要求加工时的刀痕沿着膛线的方向，以保证武器的射击精度和使用寿命。枪管

上的弹膛，要求具有较小的表面粗糙度，且不容许有较深的横向刀痕，否则便会增大抽壳阻力，使抽壳困难，造成射击频率降低或自动机不能可靠地工作。自动武器上的某些受力零件，例如击针、拉壳钩等，在加工过程的末尾，需要把加工中留下的横向刀痕打磨成纵向痕迹（使刀痕与产生应力集中的方向平行），或者需要进行强化处理，使零件表面产生残存的压缩应力，其目的是减少应力集中，提高疲劳强度与零件的寿命，亦即提高整个武器的使用寿命。可见，零件的表面质量对整个产品或武器的使用性能影响很大。

零件的表面质量对其使用性能的影响，主要有以下四个方面：

一、对耐磨性的影响

零件的使用期限（指零件使用到必须进行修理时为止的时间）、使用寿命（指从零件投入使用开始，中间经过若干次修理，直到完全丧失工作能力而必须报废为止的全部使用时间）往往取决于零件本身的耐磨性。零件的耐磨性与其结构、材料、热处理和润滑条件有关，同时也与零件的表面质量有关。零件的表面质量对零件耐磨性的影响，可从下列三个方面来分析。

1． 表面粗糙度对耐磨性的影响

机械加工后的零件表面是由许多波峰和波谷构成的。当两个零件的表面接触时，从理论上讲是互相紧贴，但实际上只是轮廓表面上的一些凸峰顶部接触，实际接触面积要比理论接触面积小得多。表面愈粗糙，实际接触面积就愈小。例如车、铣加工后的表面，实际接触面积仅为理论接触面积的15～20%，精磨后可提高到30～50%，研磨后可达到90～97%。所以，在正压力的作用下，峰顶局部单位面积上的压力可能超过材料本身的屈服极限而产生塑性变形。当两个接触表面作相对运动时，凸峰部分会折断或产生塑性滑移，因此磨损速度较快。凸峰的大部分被磨去，这就是初期磨损阶段，又叫磨合阶段。在这个阶段中，摩擦表面粗糙度的高度通常要降低65～75%。此后，由于凸峰被磨平到一定程度，故接触面积加大，接触点的压应力减小，使磨损速度变慢，于是便进入了正常磨损阶段（稳定磨损阶段）。经过相当长一段稳定磨损期以后，由于表面粗糙度被磨平，表面之间的润滑油被挤出，磨损剧烈增加，便进入了急剧磨损阶段。在这一阶段中，由于摩擦条件的改变，加剧了磨损。摩擦副的金属表面直接接触，分子之间由于亲和力而粘结在一起（称为冷焊）。随着运动的进行，粘结处在剪切的作用下发生撕裂而破坏。有时还由于摩擦产生的热量而使局部接触面上出现高温，以致改变了这部分金属的金相组织，导致硬度降低，这层软金属极容易被刮去，因此产生急剧磨损。摩擦产生的高温，有时也可能使摩擦面局部熔化在一起（称为热焊），使表面遭到破坏。

当零件的表面粗糙度很小时，则摩擦副的接触面积便可增加，若正压力一定时，实际接触面上的单位压力就小，故磨损速度可以减小，亦即较小的表面粗糙度可以提高零件的耐磨性，延长零件的使用寿命。

表面粗糙度对摩擦面的磨损影响很大，但并不是表面粗糙度愈小愈耐磨。因为表面粗糙度愈小，两表面间紧紧贴住，不易形成润滑油膜，而且两表面分子间的亲和力增加，反而使磨损剧烈增加。所以，在一定的摩擦条件下，零件表面有一个最适合的表面粗糙度。图3-3所示为实验所得的表面粗糙度与初期磨损量的关系曲线。从曲线1可见，存在着某个最佳点（o_1），这一点所示的粗糙度是零件最耐磨的粗糙度，具有这样粗糙度的零件其初期磨损量最小（当磨损极限一定时，若初期磨损量小，则意味着延长了使用寿命）。如摩擦载荷加重

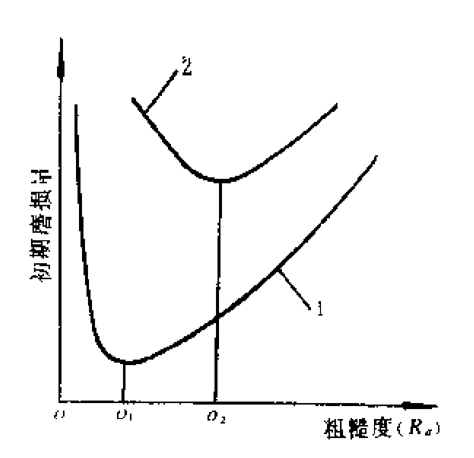


图3-3 表面粗糙度与初期磨损量的关系

1—轻载荷；2—重载荷

或润滑条件恶化时，磨损曲线2向右上方移动，最佳粗糙度也随之右移（o_2）。在最佳点的右侧，当表面粗糙度（Ra）增加时，实际接触面积减小，压强增大，同时不平的凸峰互相啮合、挤裂和切断加剧，所以磨损加剧；在最佳点的左侧，当Ra减小时，由于分子粘合作用而咬合起来，使润滑油挤出，致使磨损加剧。粗糙度的最佳点其Ra通常为0.8～0.4。

高精度的动压或静压轴承表面，为了建立薄层油膜（完全液体润滑时，要求粗糙度不刺破油膜，粗糙度越小，允许的油膜厚度越薄，承载能力就越大），要求较小的粗糙度；对于高精度且配合要求非常严密的滑柱阀，为了尽可能小的初期磨损量和获得稳定的尺寸，也要求较小的粗糙度，通常它们的Ra为0.1～0.025。

2. 表面粗糙度的轮廓形状及加工痕迹方向对零件耐磨性的影响

实验研究表明，在同样表面粗糙度的条件下（如图3-4），圆弧形轮廓要比尖峰形轮廓耐磨，一方面是由于实际接触面积增加，另一方面是由于摩擦系数的减小。

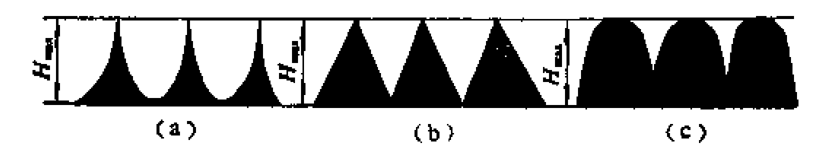


图3-4 几种机械加工获得的表面粗糙度的轮廓形状

（a）车削表面；（b）磨削表面；（c）抛光表面

表面加工痕迹的方向（即表面粗糙度的纹路方向）对零件耐磨性也有影响。它随摩擦形式、摩擦条件和粗糙度的不同而不同。

在液体摩擦条件下，当载荷小、单位压力不大、表面粗糙度又较小时，加工痕迹的方向是没有意义的。若粗糙度增大，其纹路方向对零件磨损便有影响了。若两个相互摩擦的表面加工痕迹方向均与摩擦运动方向平行，磨损量为最小，这是由于两表面之间受到突峰的阻碍较少，且有大量的润滑油能防止金属的粘合作用所致。若两表面的加工痕迹平行且与摩擦运动方向垂直时，磨损量为最大，这是因为两个摩擦面在作相对运动时切去了妨碍运动的粗糙度痕迹，所以磨损剧烈。

在边界摩擦的条件下（或单位压力加大时），加工痕迹和运动方向平行时，容易产生咬合和擦伤，磨损急剧增加。当两摩擦面加工痕迹相互平行且垂直于运动方向时，磨损就大。

当两摩擦面的加工痕迹互相垂直时，咬合的危险最小，故磨损最小。

在干摩擦的条件下，不论什么情况，摩擦副上的加工痕迹方向与摩擦运动方向相垂直时，其磨损量为最大。

因此，象发动机曲轴轴颈是在充分的润滑条件下工作的，加工痕迹应当平行于摩擦运动的方向；机床导轨和刀架是在边界摩擦条件下工作的，运动件上的加工痕迹以相互垂直且其一与摩擦运动方向一致较为有利。弹丸在膛内运动，属于干摩擦，从减少摩擦与磨损的角度来看，加工痕迹应与摩擦运动的方向一致。

所以，在设计机械产品或武器时，不仅要确定零件的表面粗糙度的大小，有时对某些零件还要注明加工痕迹（粗糙度）的方向。

3．表面层的加工硬化对耐磨性的影响

零件的表面层在机械加工过程中都有一定程度的加工硬化。加工硬化提高了零件表面层的硬度与接触刚度，减少了摩擦表面发生变形的可能性和金属咬合的现象，因面提高了零件的耐磨性。

对于润滑条件良好的表面，提高加工硬化程度有助于提高耐磨性；对于在干摩擦条件下工作的表面，高硬化程度对零件的耐磨性不利。尤其当摩擦速度很高时，硬化程度越高，表面越易磨损。因为高的摩擦速度将使干摩擦表面产生高温，致使硬化消除，而硬化作用留下的表面层金属组织疏松和晶粒碎裂，将促使表面耐磨性急剧下降。如果表面在干摩擦条件下工作且摩擦速度较低，工作表面较低的硬化程度反面更好。

加工硬化能够提高零件的耐磨性，但并不是加工硬化程度越高，耐磨性就越好。图3-5所示为T7A钢的硬度因加工硬化提高到3800N/mm²左右时，耐磨性最佳。如再进一步加工硬化，耐磨性将转面恶化。其原因是过度的硬化将引起金属组织的过度疏松，甚至出现表面微观裂纹。

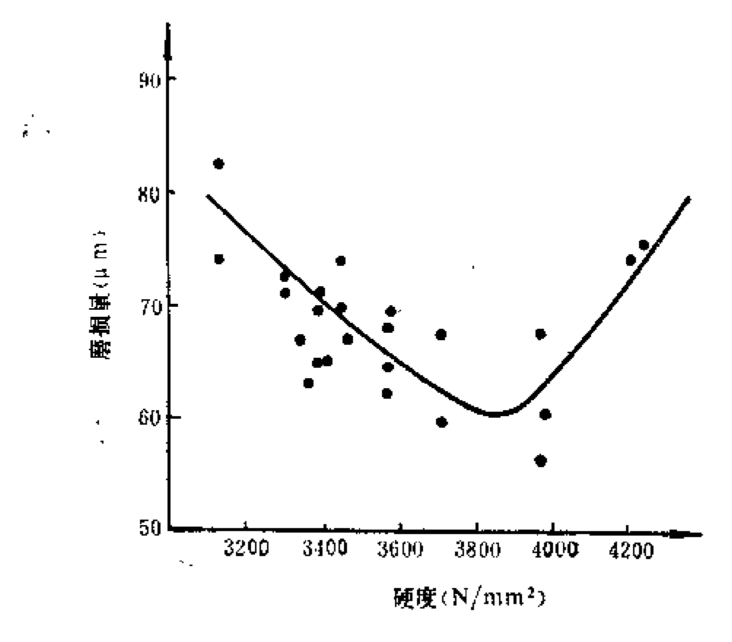


图3-5　T7A钢车削加工后，不同加工硬化程度与耐磨性的关系

如果已加工表面层的金相组织发生变化，会改变原来的硬度，例如淬硬工件在磨削时产生的表面烧伤，使烧伤处的金相组织发生变化，硬度降低，因而也降低了零件的耐磨性。

二、对疲劳强度的影响

1. 表面微观几何形状对疲劳强度的影响

金属零件由于疲劳而破坏都是从表面层开始的，这是由于表面层的粗糙度对零件的疲劳强度的影响。在交变载荷的作用下，零件表面粗糙度、划痕的凹谷处会产生应力集中，凹谷的凹陷越深、越尖，应力集中的现象就越严重。谷底出现的应力比作用在表面层的平均应力大0.5～1.5倍，应力的数值可能超过金属的疲劳极限，这是形成疲劳裂纹的原因。由于在谷底产生了疲劳裂纹，随着疲劳裂纹的逐渐扩大和加深，便导致零件产生断裂破坏。因此，对于承受周期性交变载荷的零件，减小表面粗糙度便能提高零件表面的疲劳强度。以40Cr14Ni14W2Mo钢零件的疲劳强度实验结果为例，当其表面粗糙度Ra由0.025变为0.2时，其疲劳强度下降25%。对于不同的材料，表面粗糙度对疲劳强度的影响程度也不同，材料的晶粒越细小，质地越致密，则对应力集中也越敏感，表面粗糙度对疲劳强度的影响程度也越严重。应力集中的敏感性以钢材为最强，铸铁和有色金属的影响较弱，故表面粗糙度对铸铁和有色金属的疲劳强度影响不大。

零件表面圆弧形的微观轮廓比尖峰形轮廓形状的疲劳强度要高，因而用电抛光加工出的零件其疲劳强度要比机械抛光出来的高。其原因是由于电抛光后的凹坑曲率半径增大了，应力集中的现象减轻。而用电火花加工出来的表面，由于出现大量的微观裂纹，所以其疲劳强度降低。

2. 表面层的机械物理性能对疲劳强度的影响

表面层的残余应力对零件疲劳强度有显著影响。表面层有残余压应力，将抵消一部分交变载荷引起的拉应力，因而提高了零件的疲劳强度。反之，表面层有残余拉应力，则导致疲劳强度显著下降。表面冷作硬化、热处理均能使工件表面产生很大的残余压应力，故能提高零件的疲劳强度；但对零件表面进行镀层以后，由于在镀层中产生很大的残余拉应力，不同程度地降低了疲劳强度，特别是镀铬、镀镍以后，会使疲劳强度大大降低。

表面层的加工硬化对疲劳强度也有影响。适当的加工硬化，强化了金属的表面层，可减小交变载荷引起的交变变形幅值，阻止疲劳裂纹的产生，缓和已有裂纹的扩展，减轻表面缺陷和微观不平度的影响，因而提高了零件的疲劳强度。但加工硬化程度不能过高，否则会增加金属的脆性，可能出现较大的脆性裂纹而降低疲劳强度。

三、对配合性质的影响

配合零件，无论是哪类配合，如果表面加工太粗糙，必然要影响配合性质。

对于间隙配合，如果粗糙度太大，初期磨损量就大，从而使配合间隙迅速增大，降低配合精度（降低间隙配合的稳定性并引起间隙密封部分的泄漏等等），改变所要求的配合性质。

对于过盈配合，配合零件测量的尺寸都是微观不平度的凸峰所构成的尺寸，零件表面粗糙度过大，经过压装后，表面上的凸峰被压溃，致使实际过盈量小于理论计算过盈量，因而降低过盈配合表面的结合强度，为此，应进行补偿计算。根据实验研究，有效过盈量$\varDelta$应为

$$\varDelta=\varDelta_0-1.2(R_{z_1}+R_{z_2})$$

式中 $\varDelta_0$——实测两相配零件尺寸所得过盈量；

R_{z_1}、R_{z_2}——分别为两相配表面微观不平度的十点平均高度。

所以，对配合表面均要求具有较小的表面粗糙度。

四、对耐腐蚀性的影响

零件在空气中特别是在潮湿空气中或在腐蚀性介质中工作时，会发生化学腐蚀或电化学腐蚀。由于粗糙表面的凹谷处容易积聚腐蚀性介质而发生化学腐蚀，或在表面粗糙度的凸峰间容易产生电化学作用而引起电化学腐蚀。表面越粗糙，凹谷深度越大，底部圆角半径越小，越容易腐蚀，并且微观轮廓形状呈尖峰状者比呈圆弧形者容易腐蚀，所以，为了提高零件的耐腐蚀性，应采用较小的表面粗糙度。

某些零件按其在机构中的作用并不要求有较小的粗糙度，但由于工作环境要求它有较好的抗腐蚀能力，所以零件表面最后要经过抛光，使其具有较小的粗糙度。

表面加工硬化或存在残余压应力有助于表面显微裂纹的封闭，因而可以提高耐腐蚀性。

除上述四个方面以外，表面粗糙度还对接触刚度、结合的密封性、运动阻力、测量精度、反射能力、胶合强度、镀层附着力以及外观和清洁卫生等均有影响；表面残余应力的存在，会使零件在工作中继续变形，影响原有精度，这些，由于篇幅所限，不再阐述。

综上所述，可以提出以下三点结论：

1． 减小零件表面粗糙度，可以提高零件的耐磨性、疲劳强度、配合性质的稳定性和耐腐蚀性。对于一定条件下工作的摩擦副则有一个最合理的粗糙度要求，过高或过低的粗糙度都是不利的。对某些零件的表面既要注意粗糙度的大小，还要注意加工痕迹的方向。

2． 零件表面层的加工硬化，有利于提高零件的耐磨性、疲劳强度和耐腐蚀性，但加工硬化程度不能太高，否则会使金属变脆。

3． 表面层具有残余压应力，能提高零件的疲劳强度和抗腐蚀疲劳。但若表面层存在残余拉应力，零件的疲劳强度将显著下降。

第三节　产生表面粗糙度的原因及减小措施

一、切削加工

（一）产生表面粗糙度的原因

切削加工时，产生表面粗糙度的原因，可归纳为三个方面：刀具在工件表面留下的残留面积；由于塑性变形和其它物理因素引起的表面不平度以及由于刀刃与工件相对位置微幅变动所形成的粗糙度。

1． 刀刃在工件表面留下的残留面积

切削时，由于刀刃的形状和进给量的影响，不可能把余量沿切深完全切除而留下一定的残留面积（只有当刀具带有副偏角$K_r'=0$的修光刃、且进给量f小于修光刃宽度时，理论上才不产生残留面积）。这残留面积就形成了表面粗糙度。以车削为例，如果切削深度a_p较大，主要是以刀刃的直线部分形成微观不平度，则可不考虑刀尖圆弧半径r_e的影响，如图3-6（a）所示，这时微观不平度高度（十点平均高度）R_z为

$$R_z=H=f/(\mathrm{ctg}K_r+\mathrm{ctg}K_r')$$

式中　K_r、K_r'——刀尖的主偏角和副偏角。

如果切深a_p和进给量f较小，工件的微观不平度高度R_z主要由刀尖的圆弧部分构成，如图3-6（b）所示，这时

$$R_z=H=r_\varepsilon\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right)=2r_\varepsilon\sin^2\frac{\alpha}{4}$$

当α很小时，$\sin\frac{\alpha}{4}\approx\frac{1}{2}\sin\frac{\alpha}{2}$，且$f=2r_\varepsilon\sin\frac{\alpha}{2}$

故　$$R_z=H=2r_\varepsilon\sin^2\frac{\alpha}{4}\approx2r_\varepsilon\left(\frac{1}{2}\sin\frac{\alpha}{2}\right)^2=2r_\varepsilon\left(\frac{f}{4r_\varepsilon}\right)^2=\frac{f^2}{8r_\varepsilon}$$

式中　r_ε——刀尖圆弧半径。

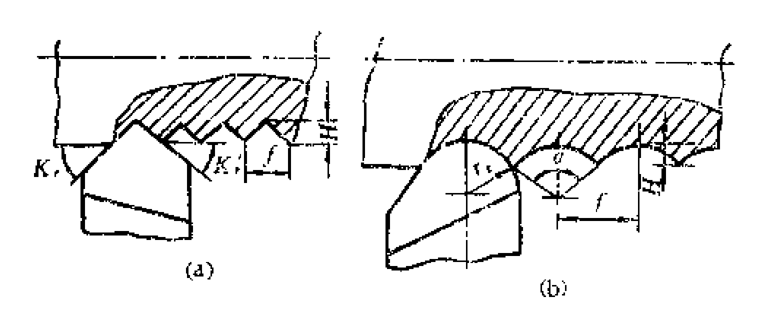


图3-6　车削外圆时残留面积的高度

（a）尖刀；　（b）圆头刀

由上式可见，减小f、K_r、K_r'或增大r_ε都能减小残留面积的高度，即减小表面粗糙度。

实际上加工表面的微观不平度高度R_z总是大于残留面积的高度H，只有在高速切削塑性材料时，R_z与H才比较接近。

2．塑性变形以及其它物理因素引起的粗糙度

切削过程中，理想轮廓形状（残留面积形成的廓形）因塑性变形等物理因素的影响而歪曲，使粗糙度增大。这些物理因素的影响，一般比较复杂，它与被加工表面的形成过程密切相关。其中积屑瘤和鳞刺对表面粗糙度的影响较大。

（1）积屑瘤（又叫刀瘤）

用中、低速（一般$v<80$m/min）切削塑性材料时，由于切屑的滞流层强烈地粘附在刀具前面上停留不动，与切屑间产生相对运动面形成积屑瘤。积屑瘤的层积成长时，会伸出刀刃和刀尖之外，且其硬度大为增加（约提高2.5～3.5倍），故能代替刃口进行切削，如图3-7所示。由于积屑瘤各点伸出刀尖的距离不等，因而在加工表面刻出与切削速度方向平行的犁沟，使表面粗糙度增大。切削过程中，积屑瘤的前端受到冲击或遇到材料中的硬点，导致积屑瘤前端局部脱落，这时犁沟中断，积屑瘤碎片1镶嵌在犁沟2终点处，见图3-7（c)。它也影响已加工表面的粗糙度。积屑瘤的产生、层积与脱落如图3-7所示。

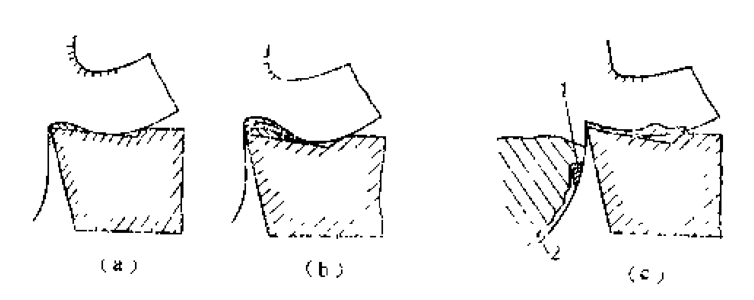


图3-7　积屑瘤的产生、层积和脱落

（a）产生；（b）层积长成；（c）脱落

由实验得知：刀具前面平均切削温度在某一范围时积屑瘤最高，切削温度超过某一数值时，积屑瘤就会消失。例如切削中碳钢时，刀具前面平均切削温度约在300 ℃时积屑瘤最高，超过500℃时积屑瘤消失。切削速度对切削温度影响最大，因此合理地选择切削用量，就能抑制积屑瘤。图3-8是车削40钢时切削速度、进给量与积屑瘤消失区的关系。图3-9是车削45钢时积屑瘤高度、表面粗糙度与切削速度的关系。此外采用润滑性能优良的切削液，增大刀具的前角，用热处理提高工件材料硬度并降低其塑性等，均能抑制积屑瘤的产生。

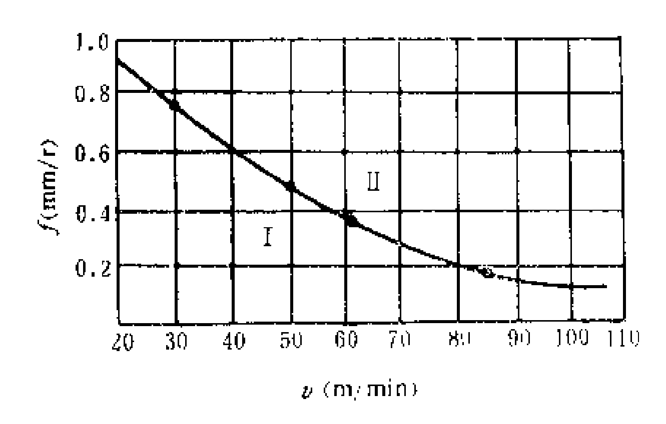


图3-8 切削速度v，进给量f和积屑瘤消失区的关系
Ⅰ—积屑瘤形成区；Ⅱ—积屑瘤消失区

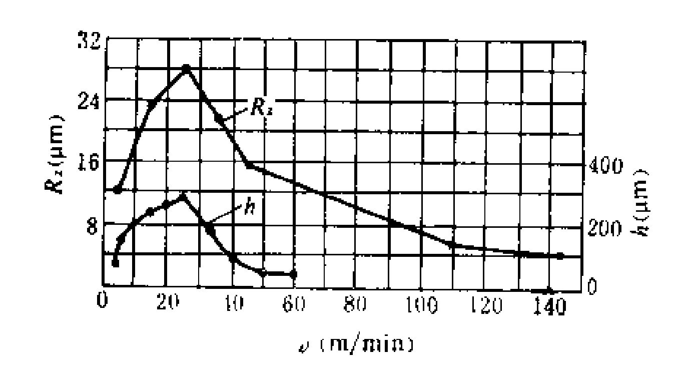


图3-9 积屑瘤高度h；微观不平度高度R_z与切削速度v的关系

（2）鳞刺

用较低或中等切削速度切削塑性金属时，在已加工表面上常会出现周期性的鳞片状毛刺，称为鳞刺。鳞刺对表面质量有严重影响，它往往使表面粗糙度增大2～4个等级。鳞刺的形成过程如图3-10所示。在切削过程中，由于切屑刚切离的新鲜表面对刀具前面的抹拭作用，将摩擦面上有润滑作用的吸附膜逐步抹去，使刀-屑面间的摩擦系数逐渐增大，实际接触面积也逐渐增大。强烈的摩擦作用，使切屑流动受阻而粘附在刀具前面上〔图3-10（a）〕。由于切屑在刀具前面上停留，而刀具与工件继续相对运动，以其圆钝外形推挤切削层，结果在刀刃的前下方出现裂口〔图3-10(b)〕。切削层中受推挤的金属积聚在原切屑下方，切削厚度逐渐增大，切削力也随之增大，裂口也增大〔图3-10(c)〕。当层积的金属达到一定厚度时，切削力在沿切屑流出方向的分力增加到足以克服刀-屑面间的粘附力时，切屑又重新沿刀具前面流出，刀刃便刮出鳞刺顶部，一个鳞刺的形成过程便告结束〔图3-10(d)〕。

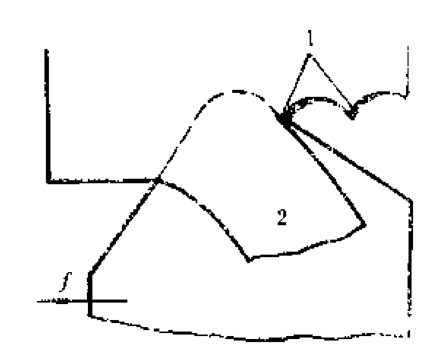


图3-12 残留面积的歪斜

1—残留面积的歪斜；2—切屑

（二）影响表面粗糙度的因素

影响切削加工表面粗糙度的因素主要有：

1． 切削条件方面

（1）切削速度v v较低易产生鳞刺，低速至中速易形成积屑瘤。提高v，抑制鳞刺或积屑瘤以至消失，这是保证减小粗糙度的重要条件。

实验证明：切削韧性材料时，在$v<3\sim4$m/min 的情况下，因切削温度低，没有积屑瘤产生，因而表面粗糙度也较小；v提高到 20～30m/min，则随着切屑的形成和切屑与前刀面的摩擦，产生大量的热，容易产生积屑瘤，表面粗糙度增大；$v>50\sim70$m/min，切削热增加，使切屑温度大为升高，积屑瘤减小；再提高切削速度，温度更高，积屑瘤就逐渐消失，表面粗糙度进一步改善。所以要获得小的表面粗糙度，或者用很低的切削速度，如用宽刀精车时；或者用很高的切削速度，如精细车削时，而不能采用中等速度。铣削与车削相似，一般常用高速精铣的方法来获得较小粗糙度表面。铰削的方法与宽刀车削（每转进给量对工件表面粗糙度影响不大）相似，一般要在低速下进行，速度增高将使表面粗糙度恶化。

切削脆性材料时，基本上不会形成积屑瘤，故切削速度对表面粗糙度的影响较小。

（2）进给量f 减小f，可减小残留面积高度，故一般可使粗糙度减小。在粗加工和半精加工中，当$f>0.15$mm/r时，f对表面粗糙度R_z的影响很大。当$f<0.15$mm/r 时，f的进一步减小却不能引起R_z明显减小，因为这时塑性变形对表面粗糙度的影响，已逐步上升到比较主导的地位。当$f<0.02$mm/r 时，f的减小就不能再使R_z减小，甚至还有增大趋势，因为这时表面粗糙度基本上取决于被加工表面的塑性变形程度。

（3）切削深度a_p a_p对表面粗糙度基本上没有影响，只有当a_p过小时，象过小的f一样，刃口圆弧切不下切屑将在加工表面上引起附加的塑性变形而影响表面粗糙度。当然，过大的a_p也会因切削力、切削热剧增而影响加工精度和表面质量。

（4）切削液 切削液的冷却作用和润滑作用能减小切削过程的界面摩擦，降低切削区温度，从而减小切削过程的塑性变形，并抑制鳞刺和积屑瘤的生长，因此对减小表面粗糙度有很大的作用。如切削液中添加含硫、磷、氯等极压添加剂，则效果更显著。

2． 刀具方面

（1）刀具几何参数

刀尖圆弧半径r_ε r_ε直接影响残留面积高度，故对表面粗糙度的影响较大。

主偏角K_r 精加工时往往$r_\varepsilon>0$，且f也较小，主切削刃并不参与残留面积的组成，故一般

K_r对表面粗糙度的影响极小。

副偏角K_r'　在f较大而r_ε较小的情况下，副切削刃也参与残留面积的组成，故K_r'越小则表面粗糙度也越小。当K_r'达一定数值时，副刃就不参与残留面积的组成，再增大K_r'，也不会使表面粗糙度增加。

前角γ_0　γ_0对表面粗糙度没有直接影响。由于γ_0大时对抑制积屑瘤和鳞刺有利，且增大γ_0可使刀刃圆弧半径r_n减小，故在中、低速范围内适当增大γ_0可有利于减小表面粗糙度。

（2）刀具表面粗糙度　在精加工中，刀面本身的粗糙度对加工表面的粗糙度也有一定影响。减小刀面粗糙度不仅可以减小刃口的缺陷（如锯齿形），同时还有利于减少摩擦和磨损，提高刀具耐用度，减少塑性变形，并能抑制积屑瘤与鳞刺的生成，故对减小表面粗糙度是有利的。通常刀刃前后刀面的粗糙度应比加工面的粗糙度小1～2级。最大Ra不得超过1.6。在加工塑性高的材料时，刀具表面往往还需抛光镀铬，以提高刀具的抗粘结性能，使排屑顺利。对于硬质合金刀的前后刀面都应抛光到Ra0.4～0.2。刀具磨钝后，会使加工表面的粗糙度增大，其R_z可能增大50～60%。保证前后刀面的粗糙度，虽然增加了刃磨成本，但能提高加工表面质量和刀具耐用度，故非常必要。

（3）刀具材料　刀具材料与被加工材料金属分子的亲和力大时，被加工材料容易与刀具粘结而生成积屑瘤，且被粘结在刀刃上的金属与加工表面分离时还会形成附加粗糙度，故刀具材料与工件材料亲和力小的，可在同样条件下得到较小的粗糙度。例如用陶瓷刀车削45钢时，（$v=150$m/min、$a_p=0.8$mm、$f=0.125$mm/r），加工粗糙度比同样条件下用硬质合金的小。

3．被加工材料的性能和金相组织

一般地说，材料的韧性越大则加工表面越不易光洁。被加工材料对表面粗糙度的影响与其金相组织状态有关。对于低碳钢、低碳合金钢（含C量到0.35%）应降低塑性，提高硬度，较好的组织是铁素体加低碳马氏体（用不完全淬火获得，硬度在2300N/mm²左右），铁素体加索氏体或铁素体加片状珠光体。铁素体的分布应均匀、细密、避免大片状方向性析出或有大块聚结。中碳钢、中碳合金钢（含C量在0.35～0.55%）在较低的切削速度（10～15m/min）下，应有片状珠光体加细晶粒的铁素体，较高的切削速度以粒状珠光体为合适。高碳钢、高碳合金钢切出的表面粗糙度一般较小，为照顾刀具耐用度，应有粒状珠光体组织，高碳钢中合金元素碳化物的分布要细而匀。易削钢中含有硫、铅等元素，可减小表面粗糙度。灰铸铁中石墨的颗粒尺寸小可获得较小的表面粗糙度。

（三）减小切削加工表面粗糙度的措施

要减小切削加工表面粗糙度，首先要找出影响表面粗糙度的主要原因，是几何因素，还是塑性变形或者是工艺系统的振动，然后才能采取有效措施。

如果已加工表面的走刀痕迹比较清楚，这说明影响粗糙度的主要是几何因素，那末要进一步减小粗糙度，就应该首先考虑减小残留面积的高度。减小残留面积的方法，首先是改变刀具的几何参数，增大刀尖圆弧半径r_ε和减小副偏角K_r'。采用带有$K_r'=0$的修光刃的刀具或宽刃精刨刀、精车刀也是生产中减小加工表面粗糙度所常用的方法。不论是增大r_ε、减小K_r'或用宽刃刀都要注意避免振动。减小进给量f也能有效地减小残留面积的高度，但减少f会降低生产率，故只有在改变刀具几何参数后会引起振动或其它不良影响时，才考虑降低f。

若已加工表面出现鳞刺或积屑瘤引起的沟槽，那末降低表面粗糙度应从消灭鳞刺和积屑

瘤着手，可根据具体情况，采取以下措施：

（1）根据具体情况，改用更低的或较高的切削速度，并配合较小的进给量，可有效地抑制鳞刺和积屑瘤的生长。

（2）在中、低速切削时加大前角γ_0对抑制鳞刺和积屑瘤有良好的效果（高速切削时无明显的效果），同时适当增大一些后角，对减少鳞刺也有一定效果。

（3）改用润滑性能良好的切削液如动、植物油，极压乳化液或极压切削油等。

（4）必要时可对工件材料先进行正火、调质等热处理，以提高硬度，降低塑性和韧性。

若表面粗糙度的恶化是由工艺系统的振动所引起的，则应采用消减振动的措施以减小表面粗糙度，具体方法可参阅有关专著。

二、磨削加工

（一）磨削加工的特点

磨削加工是目前用得最多的一种精加工方法，大部分零件较小的表面粗糙度最后均是由磨削达到的。磨削加工与用一般刀具进行切削加工相比有以下几个特点：

1. 磨削是由砂轮外表面上的很多磨粒进行切削的。这些磨粒形状是不规则的，在砂轮表面上的分布是不均匀的，因此切刃的形状和分布都带有随机性，这与一般车削、铣削等是很不相同的。

2. 砂轮在加工前要进行修整，修整方式及用量对于砂轮的切削性能有很大影响。在磨削加工中，由于磨粒的磨损、破碎，切削力增大，在一定条件下，自动脱落，露出新的一层磨粒，切刃不断更新，这叫做砂轮的自锐作用或称自砺性，这是其它切削加工所没有的。

3. 磨削是一种速度很高、切削厚度极薄的加工方法。磨粒的磨削过程大致可分为以下三个阶段：

（1）滑擦阶段　开始时磨粒挤入被加工表面，由于切削深度极小，磨粒刀尖的圆弧半径r_n形成的实际负前角很大，使磨粒只是与被加工表面产生滑擦，根本不产生切削，也没有塑性变形，只有弹性变形，这叫做磨粒的滑擦作用。

（2）刻划阶段　当磨粒挤入被加工表面的深度逐渐增大时，径向力也随之增大，工件表面也由弹性变形过渡到塑性变形。此时，挤压摩擦剧烈，热应力急剧增加，磨粒在工件表面挤压刻划出沟痕，工件材料被挤向两旁而产生隆起凸出。虽然这时产生了塑性变形但仍没有产生切削，这称为磨粒的刻划作用或耕犁作用。在多次刻划作用下，金属会由于疲劳而断裂和脱落。

（3）切削阶段　当磨粒比较尖锐，挤入被加工表面的深度较大，径向力也较大时，此时磨粒进行切削，被推挤的金属层明显地滑移并形成切屑而从前刀面流出。这时切屑可以是由于高温而成为灰烬，也可以一端被熔化而成为蝌蚪形切屑，也可以仍保持带状或挤裂状切屑，这叫做磨粒的切削作用。

由于磨粒分布的随机性，有些磨粒上述三个阶段连续发生，有的磨粒只发生滑擦和耕犁，有的磨粒只起滑擦作用。

4. 磨粒一般都是以负前角切削，单位切削力比较大，磨削速度一般又很高，因此切削区的温度很高，根据实验研究，切削区的温度可高达1500～1600℃，超过了材料的熔点，因而产生火花。而工件表层的温度也常达900℃，超过了A_3线(相变温度)。磨削时加热速度快（一般为每秒几万度），高温下持续时间短（小于一秒），冷却速度快（每秒几千度）。

（二）磨削加工时产生表面粗糙度的原因

磨削加工时产生表面粗糙度的原因与切削加工时产生表面粗糙度的原因相同，亦即是由磨粒在工件表面所造成的残留面积、塑性变形等物理因素的影响和砂轮与工件相对位置的微幅变动所引起。这里需要指出的是：磨削过程中塑性变形对表面粗糙度的影响要比切削加工大。例如耕犁所形成的沟槽两侧隆起增大了表面粗糙度；磨削区的高温使工件金属表层软化、甚至出现微熔，增加了塑性变形，还可能被滑擦、挤压而涂抹在已加工表面上，使表面粗糙度进一步增大。

（三）影响磨削加工表面粗糙度的因素

1．磨削用量

（1）砂轮线速度v_s　v_s对表面粗糙度有显著影响，v_s大时，一方面同一时间内参与切削的磨粒刃口增多（亦即单位工作面上通过的磨粒增多），残留面积就小；另一方面v_s增大则每一个刃口切除的金属量减少（即每一磨粒的切削厚度减小）；而且高速磨削下塑性变形也不充分，结果塑性变形程度也小。因此，提高v_s有利于减小磨削表面的粗糙度。

（2）工件速度v_w和工作台速度v_{ft}　v_w低，则每一刃口的平均切削厚度减小；v_{ft}小，则加工表面上同一点的磨削次数多，因此都有利于减小表面粗糙度。当v_w降低而v_{ft}不变时(即纵向进给f_a增加），这时，表面粗糙度将受到两个因素变化的影响：v_w降低则表面粗糙度减小，f_a增加又会使表面粗糙度增大。一般情况下，v_w的影响大于f_a，故v_w降低而v_{ft}不变时，表面粗糙度仍有所减小。但是还必须注意：v_w低时，工件与砂轮的接触时间较长，故传到工件上的热量增多，因此，若v_w过低时，就会增加金属表面的微熔，从而使表面粗糙度增大，同时还有增大表面烧伤的可能性。

（3）磨削深度（每次行程的径向进给量）a_e　a_e对表面粗糙度的影响较大。a_e大，每颗磨粒的切削负荷就大，使磨削力和磨削热增加。同时又容易破坏切削刃和切削刃上的微刃，影响砂轮工作面质量和砂轮切削性能。此时，a_e大还使塑性变形程度增加。故a_e大时表面粗糙度也增大。

（4）光磨次数　光磨即无进给磨削。在磨削将结束时，不径向进给(即名义上$a_e=0$)，仅靠工艺系统弹性回复获得微量进给磨削。随着光磨次数的增加，实际磨削深度越来越小，故粗糙度得以减小。适当掌握光磨次数，对高精度、小粗糙度磨削起着重要的作用。通常光磨5～10次后，表面粗糙度就不再显著地减小了。粗粒度、细修整砂轮的微刃切削作用较强，余量除去快，磨削压力降低较快，所以摩擦抛光作用不易发挥，光磨效果不显著。细粒度石墨砂轮修整后，微刃的切削作用较弱，余量去除慢，能保持适当的磨削压力，所以摩擦抛光作用显著，光磨效果好。

2．砂轮

（1）砂轮的粒度　粒度粗细与加工表面粗糙度和磨削生产率有关。砂轮粒度越细，则砂轮单位面积上的磨粒数就越多，磨削时在工件上的刻痕就越细，粗糙度就越小。但粒度过细，容易堵塞砂轮而使工件表面塑性变形程度增加，反面会增大表面粗糙度，同时还容易产生波纹和引起烧伤。此外用细粒度砂轮只能磨去很小的余量，故在工艺上常不得不换砂轮分别进行粗、精磨，这很不方便。由于这个原因，对于表面粗糙度Ra要求大于0.05～0.025的精磨工序，一般仍希望采用中粒度（46#～60#）的砂轮，用精细修整砂轮等其它方法来达到小的表面粗糙度。只有在表面粗糙度Ra为0.025和镜面磨削（Ra小于0.008）时，才用细砂轮并

多次更换砂轮的方法。

（2）砂轮的硬度 砂轮硬度是指磨粒受磨削力后从砂轮上脱落的难易程度。砂轮太软，磨粒易脱落，就不易加工出粗糙度小的表面。砂轮太硬（结合剂粘结力强），磨粒被磨钝后不容易脱落，使工件表面上受到强烈的摩擦和挤压，增加了塑性变形程度，表面粗糙度也会增大，同时还由于大量的磨削热容易造成烧伤。只有硬度选得合适时，才有良好的自砺性，才能得到较小的表面粗糙度。

（3）砂轮的修整 砂轮修整的作用是除去外层已钝化的磨粒（或被磨屑堵塞的一层磨粒），从而保证砂轮具有足够的等高微刃。因此砂轮的修整质量将直接影响磨削表面的粗糙度。修整砂轮时，修整导程(砂轮转一转金刚石的纵向进给量)和修整时的切削深度越小，则较为容易修整出砂轮上的切削微刃，使其切削微刃增多，且等高性也越好，故可磨出粗糙度较小的工件表面。若切削深度过大，磨粒将会大颗粒的脱落或击碎，不易修整出切削刃上的微刃，致使砂轮表面粗糙，影响磨削表面粗糙度。通常砂轮每次磨钝后，修整总量一般单面为0.1mm左右，不宜过大，否则会造成砂轮过多的消耗。

3. 工件材料的性质

工件材料的硬度、塑性、导热性能对表面粗糙度都有显著影响。太硬、太软、太韧的材料都不易磨光。工件材料太硬，容易使磨粒磨钝，工件表面粗糙度当然就会增大；太软又容易堵塞砂轮，因此也不易得到较小的粗糙度；韧性大、导热性差的材料，容易使磨粒早期崩落，破坏了砂轮表面的微刃等高性，粗糙度也就随之增大。

（四）减小磨削加工表面粗糙度的措施

减小磨削加工表面粗糙度，应该从正确选择砂轮、磨削用量和切削液等方面采取措施。当磨削温度不太高、工件表面没有出现烧伤和涂抹微熔金属时，影响表面粗糙度的主要是几何因素，因此减小表面粗糙度的措施是降低工件速度v_w和工作台速度v_{ft}(提高砂轮线速度v_s往往受到机床结构和砂轮强度的限制，故一般不考虑）。因为降低v_{ft}会降低生产率，故一般应先考虑降低v_w，然后再考虑降低v_{ft}。

仔细修整砂轮（减小修整导程和修整切深）和适当增加光磨次数，也是减小表面粗糙度常用的有效措施。

如磨削表面出现微熔金属的涂抹点时，那末减小表面粗糙度的措施主要是减小磨削深度a_e，必要时可适当提高v_w。同时还应考虑砂轮是否太硬，切削液是否充分和有良好的冷却性、流动性。

如磨削表面出现拉毛、划伤，则主要检查切削液是否清洁，砂轮是否太软。

三、进一步减小表面粗糙度的加工工艺

在切削加工或磨削加工的基础上，为了进一步减小加工表面粗糙度，还可以采用冷压加工、精密切削加工和光整加工工艺。

1. 冷压加工

冷压加工就是利用挤压（包括滚压）方法减小内孔或外圆表面粗糙度。常用硬质合金、金刚石或淬火钢做挤压工具。挤压过程是使被加工表面均匀地产生塑性变形，把半精加工遗留下来的微观波峰压低，填补波谷，从而显著地减小了表面粗糙度。挤压后尺寸稍有变化，变化量决定于挤压前表面粗糙度。由于挤压很难消除原始表面的局部缺陷（如划伤、凹坑等），所以挤压前的预加工表面必须平整而均匀，粗糙度应在$Ra3.2$左右，不应大于$Ra6.3$，

滚压后可达到$Ra0.2 \sim 0.1$。挤压次数一般为1～2次。与其它精加工方法比较，挤压方法的生产率高，且表面层形成残余压应力，有利于提高疲劳强度。

2． 精密切削加工

精密切削加工时切深和进给量均很小，而切削速度很高或极低，尽可能进行充分的冷却润滑，以最大限度地排除切削力、切削热对加工质量的影响，以利于减小表面粗糙度。由于它的切削效率一般不高，加工余量不能太大，因此对前道工序也有较高的要求。

（1）高速精镗（金刚镗）和高速精车　其特点是切削速度高（$v=150 \sim 500$m/min）而切削截面小，因此切削力小、切削热少，从而能保证良好的加工精度（孔加工时IT6～7级，外圆加工时IT5～6级）和较小的表面粗糙度（$Ra0.8 \sim 0.1$，用金刚石刀具加工有色金属时，Ra可达0.05～0.012），而且加工表面变质层很浅，一般不超过15～20μm。

（2）宽刀精刨　它是用具有宽（10～50mm）而平直刃口的刨刀，以低切速（5～10m/min)、小切深（0.03～0.05mm），在工件表面切去极薄层金属的过程。依靠精细刃磨并精确安装的刀具和精度高、刚度好的机床，再加上切削过程切削力小、切削热也少，因此可以获得良好的加工质量（工件平面度误差<0.02/1000，表面粗糙度Ra为0.8）。加工时最好在刀具前面和后面同时喷射切削液。

（3）小粗糙度、高精度磨削　它是指使工件表面粗糙度Ra小于0.1、圆度误差小于0.5μm、直线度误差小于1μm/300mm、同轴度误差小于1μm或平面度误差<3μm/1000mm的磨削工艺。一般称粗糙度$Ra0.1 \sim 0.05$的磨削为精密磨削，粗糙度$Ra0.025 \sim 0.012$的磨削为超精密磨削，粗糙度Ra小于0.008时称为镜面磨削。小粗糙度、高精度磨削是靠砂轮工作面上修整出大量等高微刃而进行精密加工的，这些等高微刃能从尚具有微量缺陷和尺寸、形状误差的工件表面切除极微薄的余量，因而可获得很高的加工精度。又由于大量等高微刃在加工表面留下极微细的切削痕迹，加上无火花光磨阶段的滑擦、挤压、抛光作用，所以可得到很小的表面粗糙度。

3． 光整加工

光整加工是用粒度很细的磨料对工件表面进行微量切削和挤压、擦光的一种加工工艺。它不要求机床有精确的成形运动，而是按随机创制成形原理。加工过程中，磨具与工件的相对运动应尽量复杂，尽可能使磨料不走重复的轨迹，让工件加工表面各点都受到具有很大随机性的接触条件，以突出它们间的高点，进行互相修整，使误差逐步均化而得到消除，从而获得极光洁的表面和高于磨具原始精度的加工精度。光整加工的特点之一，是没有与磨削深度a_e相对应的磨削用量参数，而只规定加工时磨具与工件表面间的压力。磨具相对于工件的定位基准间就没有确定的位置，因此，一般不能修正加工表面的位置误差，要靠前道工序来保证。同时，光整加工时切削效率极低，如余量太大，不仅生产效率低，有时甚至会使已取得的精度下降，因此采用光整加工的目的，主要是提高工件的表面质量。

（1）研磨　它是最常用的一种光整加工方法，用于研磨平面、圆柱面和螺纹等。尺寸精度可达0.003～0.001mm，表面粗糙度Ra为0.1～0.008，还可以提高零件的几何形状精度。研磨加工时，在研具和工件表面间加有研磨剂（由极细粒度的磨料、研磨液和辅助材料组成），研具与工件在一定压力下作复杂的相对运动，使磨料按尽可能不重复的轨迹滚动或滑动，起着切削、刮擦和挤压作用，在加工表面切下极微薄的金属层，从而获得很高的表面质量和加工精度。同时研磨剂中的辅助材料还会使加工表面形成一层易于被磨料切除的氧化

膜，藉以提高研磨效果。

按照研磨方式，研磨可分为手工研磨和机动研磨两种；按研磨剂的使用条件，研磨可分为自由嵌砂研磨、强迫嵌砂研磨和无嵌砂研磨三种。其具体内容与方法，此处从略。

（2）珩磨　它是大批大量生产和成批生产中最常见的孔加工方法。利用安装于珩磨头圆周上的若干条(一般为2～12条)油石3〔见图3-13(a)〕，由张开机构将油石沿径向张开，使其压向工件孔壁以便产生一定的面接触，同时使磨头作旋转（定时改变旋转方向）和往复运动，由此而实现对孔的低速磨削。珩磨头在珩磨时不仅作旋转及往复运动，使加工表面形成交叉的螺旋线切削轨迹，而且在每次往复行程时间内磨头的转数为非整数，因此两次行程间，磨头相对工件在周向又错开一定角度，这样使磨头上每一磨粒在孔壁上的运动轨迹不会重复，工件表面上磨粒的切削轨迹是既交叉而又不相重复的网纹，见图3-13(b)。珩磨时，由于压力低、切深小，故磨粒的切削能力较弱，主要起挤压、抛光作用。而且切削轨迹不重复，切削过程平稳，再加上珩磨时大量切削液的冲洗，切削热少，故可获得较高的表面质量和加工精度，(尺寸精度可达IT6级，表面粗糙度Ra可达0.025～0.012)。火炮的炮膛，14.5mm高射机枪机匣的内孔，发动机的气缸等均采用珩磨。

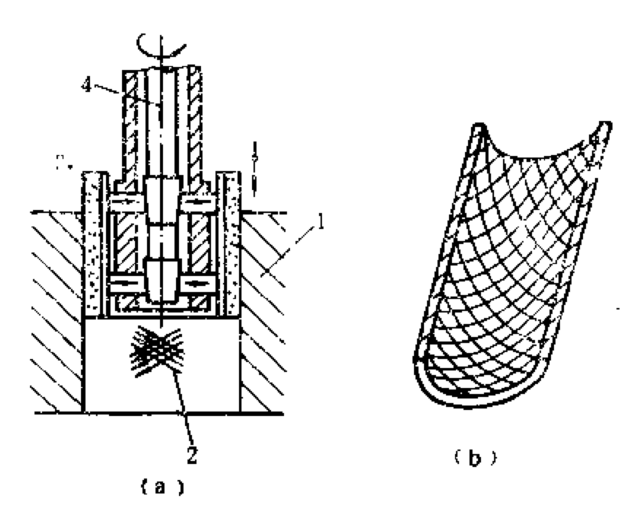


图3-13　珩磨头切削运动及被加工孔表面的交叉网纹
（a）珩磨头的切削运动；（b）被加工孔表面的交叉网纹
1—工件；2—加工纹路；3—油石；4—推杆

（3）超精加工　它是采用细粒度磨粒的油石在一定压力下作短行程的往复振动，以实现对旋转着的工件表面进行微量磨削的一种光整加工方法，它可以得到很小的表面粗糙度和圆度误差，并能消除磨削中产生的难以去掉的振纹、波纹、螺旋线等缺陷和变质层。

（4）抛光　抛光是外圆、内孔以及形面等光整加工方法之一。通常是用弹性轮(毡轮、布轮、皮轮等）粘上磨料或涂上抛光膏（由粉粒状的抛光材料与油脂及其它适当成分介质均匀混合而成）来加工工件表面。常用的抛光材料包括氧化铝、碳化硅以及氧化络、氧化铁等。通常抛光又包括砂光与擦亮两个部分。砂光是指用胶固定的磨粒进行表面的粗抛光工作（粗抛），擦亮是指用油脂粘住的磨粒进行表面的精抛光工作（精抛）。抛光不是以提高尺寸精度或几何精度为目的，主要是为了得到光滑表面或镜面光泽。抛光后表面粗糙度Ra可达0.8～0.012，精抛后可达镜面。抛光时抛光轮高速旋转，工件进给。工件进给的方向，一

般采用抛光轮与工件相接触处的线速度方向，这样才能获得光洁表面。

抛光多为手工操作，工作繁重，劳动条件差。当零件尺寸小不便于持抛光时，可用滚桶进行抛光。滚桶抛光就是在滚桶内置以皮革碎块或金属球，并加入碱性或酸性液体，同时将要抛光的工件置入。滚桶一般绕斜轴旋转，一定时间后，即可达到抛光的目的。

除上述抛光外，还有液体抛光和电抛光。液体抛光是用带磨料的液体经喷嘴高速喷向工件（在喷嘴中用压缩空气使磨粒得到加速），将工件表面的表面粗糙度的顶峰加以击平，从而可获得较小的表面粗糙度Ra为0.4～0.05。它的生产率高，能加工任意形状的零件。电抛光是将工件浸入专门的电解液中，以工件为阳极，紫铜或铅等材料做阴极，当接通电源时，阳极表面发生电化学溶解，粗糙度的凸峰顶上的电流密度较大，溶解较为强烈，微观凸起因面逐渐变平，且出现光泽，这样就达到了抛光的效果。

第四节　表面层机械物理性能改变的原因及其影响因素

一、表面加工硬化

（一）表面加工硬化层的形成

表面加工硬化是由于金属的冷态塑性变形引起的。机械加工时，工件表面层金属产生强烈的塑性变形，使金属的晶格被拉长、扭曲和破碎。晶粒被拉长后，横截面减小而它与相邻晶粒相接触的界面则增加，于是晶粒间表面的相互聚合力增加了，也就提高了进一步变形的抗力；晶格被扭曲，增加了晶粒间的相互干涉，使进一步的塑性变形发生困难；同时滑移平面间的小碎粒增加了滑移平面的粗糙度，也起了阻碍进一步滑移的作用。上述各种现象表明：工件因机械加工而产生塑性变形时，表层金属得到了加工硬化。

在机械加工中，由于切削要产生切削热，从而提高了工件表层金属的温度。当切削温度达到一定数值时，已加工硬化的工件表层金属会产生回复现象（弱化现象）。回复作用的速度取决于切削温度的高低，持续时间的长短和加工硬化程度的大小。切削温度越高，高温下持续时间越长，加工硬化程度越大，则回复作用也越强。

因此，机械加工时表面层的加工硬化，就是强化作用和回复作用的综合作用的结果。

（二）影响表面加工硬化的因素

1．切削条件方面对加工硬化的影响

（1）切削速度v　在低切削速度阶段，随着v的提高，塑性变形程度减小，刀具后面与工件接触时间短，加工硬化作用小；同时切削温度逐渐升高，回复作用较大，故表面加工硬化随v的提高而减小。在高切削速度阶段（$v>100$m/min时），提高v时塑性变形程度仍能减小，但切削热作用时间减短，回复作用不充分，故加工硬化程度反而有所增加。

（2）进给量f　f增加则塑性变形程度也增加，因而加工硬化程度和深度也都增加。但f太小时，因为薄切屑形成时表面层挤压作用增加，塑性变形程度也增加，因此表面加工硬化相反会随f的减小而增加。

2．刀具方面对加工硬化的影响

（1）刃口圆弧半径r_n　r_n增大将显著增加对表面层的挤压作用，因而使加工硬化也增大。

（2）刀具后面磨损量VB　VB大则刀具后面与已加工表面的摩擦也增大，故表面加工

硬化增加。

（3）前角γ_o 减小γ_o会增大已加工表面的变形，故加工硬化增大。

3． 工件材料方面对加工硬化的影响

工件材料的塑性越大，强化指数越大，则加工硬化就越严重。碳钢中含碳量越高，则强度越高，加工硬化便越小。有色金属的熔点较低，容易回复，故加工硬化要比结构钢小得多。

二、磨削烧伤

（一）磨削烧伤的形成

磨削时，磨粒在高速下以其很大的负前角切削极薄的金属层，在加工表面引起很大的摩擦和塑性变形，因此单位截面所消耗的功率远大于切削加工。这些消耗的功率绝大部分转化为磨削热。由于切屑数量少，被切屑带走的热量远少于切削加工。因此留在工件被磨削表面的热量很大，形成被磨削表面很高的温升和很大的温度梯度。严重时使表层金属的金相组织发生变化，强度和硬度下降，产生残余应力，甚至引起显微裂纹，大大地影响了零件的使用性能，这种现象称为磨削烧伤。

磨削烧伤时，工件表面因磨削热产生的氧化层厚度不同，往往会出现黄、褐、紫、青等颜色变化。有时在最后的光磨时磨去了表面烧伤变色层，实际上烧伤层并未完全去除，于是便给工件带来了隐患。

磨削淬火钢时，如果磨削区温度达到回火温度（对淬火后未回火钢）或超过原来的回火温度（对淬火后回火钢）时，工件表层原来的马氏体组织或回火马氏体组织将产生回火现象而转变为硬度较低的过回火组织，这时一般称为回火烧伤。如果磨削区温度超过相变临界温度A_{c_3}或A_{cm}时，由于切削液的急冷作用，表面最外一薄层会出现二次淬火马氏体组织，而在它的下层温度较低，冷却亦慢，则转变为过回火组织。这时最外层的二次淬火马氏体组织硬度虽较原来的回火马氏体为高，但是薄而脆，其下就是硬度较低的过回火组织，表面层机械物理性能也降低，一般称为淬火烧伤。图3-14所示是在不同磨削条件下，表面层金相组织转变情况的示意图。图3-14(a)表示在重磨削条件下产生淬火烧伤；图3-14(b)表示在中等磨削条件下产生的回火烧伤；图3-14(c)表示在轻磨削时没有发生磨削烧伤。

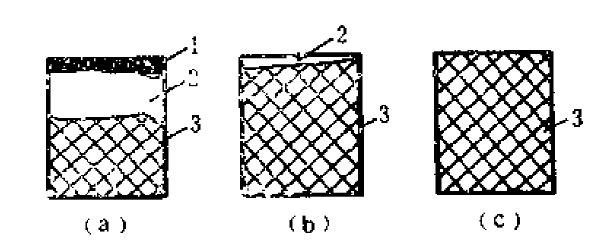


图3-14 不同磨削条件下，表层金相组织的转变情况示意图
（a）淬火烧伤；（b）回火烧伤；（c）没有烧伤
1—二次淬火组织；2—过回火组织；3—基本组织

如不用切削液进行干磨，当磨削区温度超过相变温度，则表面层金属因冷却缓慢而形成退火组织，硬度和强度均将急剧下降，形成退火烧伤。

（二）影响磨削烧伤的因素

磨削烧伤是由于磨削时表面层的高温和高温梯度引起的。凡影响磨削区温度和温度梯

度的因素，都是影响磨削烧伤的因素。主要有：砂轮线速度v_s、工件线速度v_w、进给量f_a、磨削深度a_e、工件材料的导热性以及砂轮的钝化程度和切削液等。

（三）防止磨削烧伤的措施

1. 控制磨削用量

减小a_e、提高v_w和f_a（或v_{ft}）均能改善磨削烧伤，但提高v_w和f_a会使粗糙度增大，故可在增大v_w或f_a的同时适当提高v_s。提高v_s后磨削区温度虽会升高，但它对烧伤的不利影响比提高v_w带来的有利影响为小，因此提高v_w/v_s的比值是防止烧伤的有效措施。

2. 合理选择砂轮并控制修整参数

提高磨粒硬度（如采用人造金刚石砂轮、立方氮化硼砂轮等），改用较粗粒度的砂轮，修整砂轮时适当增大修整导程和修整深度，选用较软的砂轮以提高砂轮的自砺性，都可提高砂轮的切削性能，同时砂轮又不易被磨屑堵塞，因此都有利于防止烧伤的发生。例如在磨削硬质合金时，常用的碳化硅砂轮，很难避免烧伤和裂纹。如采用金刚石砂轮进行磨削，则由于金刚石刀尖锋利，强度、硬度较大，大大改善了切削条件，再加上金刚石与硬质合金的摩擦系数很低，因此磨削区温度显著下降，便解决了烧伤、裂纹问题。对于高合金钢的磨削，常选用橡胶结合剂的砂轮。橡胶富有弹性，当某种因素导致某磨粒磨削力太大时，橡胶的弹性变形可使磨粒自动微量退让，减少磨削力，避免烧伤。

3. 采用间断磨削

在一般磨削条件下，采用开槽砂轮（在砂轮圆周上割出十几条至三十几条沿轴向的、不太深的狭槽）进行磨削，由于工件和砂轮间断接触，改善了散热条件，而且工件受热时间缩短，因此能有效地减轻烧伤程度。

4. 提高冷却效果

采用高压大流量冷却；切削液喷嘴加装空气挡板，使切削液易于进入磨削区；内冷却砂轮等等，均能提高冷却效果，降低磨削区的温度。

三、表面层残余应力

（一）表面层产生残余应力的原因

1. 切削过程中表面层局部冷态塑性变形

机械加工时，切屑是经过相当大的冷态塑性变形后被切下的，原来与其相连成一体的加工表面层同样产生了相当大的冷态塑性变形。已加工表面形成时，刀刃前方的晶粒一部分随切屑流出，另一部分留在已加工表面，在分离处晶粒在切削速度方向受压，而在垂直于切削速度方向受拉，使表层占据较小的面积，即表层在切削方向产生冷态塑性变形。当刀具把切屑切离后，基部(工件里层)金属必然要阻止其表层在切削方向冷态塑性变形所造成的收缩，结果表层就产生残余拉应力，而里层则产生残余压应力。

切削过程中，在F_y方向上也会同时发生冷态塑性变形。如刀具是负前角，表层受刀具前、后面的挤压而被压下，使表层被压薄，压薄后的表面层，在另两个方向必然要增大，但受到基部金属的限制，故表面层产生残余压应力，而里层产生残余拉应力。

在切削加工中，表层金属与后刀面摩擦时将产生冷态拉伸塑性变形，使其尺寸变长，刀具离开后，基部金属的弹性恢复受到已塑性伸长的表层的限制，于是表层将形成残余压应力，而里层仍为拉应力。

2. 表层金属冷态塑性变形后比容增大

机械加工时，表层金属的冷态塑性变形使晶格扭曲由，于原来晶格中的原子排列是紧密的，晶格扭曲后破坏了原来的紧密的原子排列，因此密度下降，比容增。大随着冷态塑性变形程度的增加，钢的比重可从7.87降至7.735左右，即比容增大了。表面层金属在冷态塑性变形后比容增大，体积增大，受到了基部金属的阻碍，于是表层就产生残余压应力，里层则为残余拉应力。

3．切削过程中表层局部的热塑性变形

切削时产生的切削热使工件产生局部高温，其温度梯度很大，它导致产生残余应力的过程，如图3-15所示。图3-15(a)为切削时从表层到里层的温度分布情况。为了便于说明问题，可以把表层到里层的金属分为三层：第Ⅰ层温度在塑性变形温度t_s以上，这层金属产生热塑性变形；第Ⅱ层温度在t_s与室温t_0之间，这层金属只产生热弹性变形；第Ⅲ层处于室温t_0，不产生热变形。由于第Ⅰ层处于塑性状态，故没有应力。第Ⅱ层金属的热弹性变形受到第Ⅲ层金属的限制，故产生压应力，而第Ⅲ层金属则产生拉应力，如图3-15(b)所示。开始冷却时，第Ⅰ层温度降低到t_s以下，体积收缩受到第Ⅱ层的阻碍而产生拉应力，第Ⅱ层中的

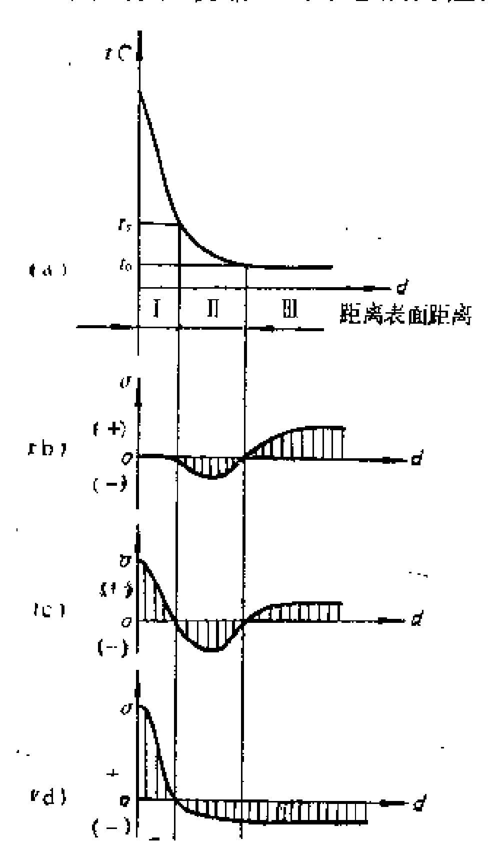


图3-15　表面切削高温引起残余应力的过程示意图
(a)由表至里的温度分布；(b)表层温度高于热塑性温度的应力分布；
(c)冷却时的应力分布；(d)完全冷却时存在的残余应力

压应力增大。由于第Ⅱ层金属的收缩，第Ⅲ层中的拉应力有所减小，如图3-15(c)所示。到完全冷却时，第Ⅰ层继续收缩，形成较大的残余拉应力，第Ⅱ层则热变形消失，完全由第Ⅰ层收缩而形成较小的残余压应力。第Ⅲ层则拉应力消失，也受第Ⅰ层影响而形成不大的压应力，如图3-15(d)所示。

4．表层局部金相组织的转变

淬火钢加工时（特别是磨削时），表面层可达到很高的温度，致使表层金相组织发生变

化，不同的金相组织比容不同，马氏体比容最大，奥氏体比容最小。如磨削淬火钢时表层出现回火结构（回火烧伤），则表层金属比容减小、体积收缩受基部金属的阻碍，表层就产生残余拉应力。如表层产生二次淬火层（淬火烧伤），则表层产生二次淬火马氏体，其体积比里层的回火组织大，因而表层产生残余压应力，里层产生残余拉应力。

实际机械加工后的表面层残余应力，是上述四方面原因综合作用的结果。在一定条件下，其中某些原因起着主导作用，表面就因之而出现或拉或压、或大或小的残余应力。还须指出的是：由于表面层各处的冷态塑性变形和热变形都不是均匀分布的，因此，在表面或距表面同一深度处，有的地方是残余压应力，有的地方则是残余拉应力。

（二）影响残余应力的因素

切削加工时，对表面残余应力影响较大的是刀具前角γ_0和切削速度v。

图3-16是不同前角的刀具车削45钢时表面层残余应力的情况。v相对较低（$v=150m/min$）时，γ_0从$+15°\sim-50°$都使工件表面带有残余拉应力，它说明这时沿切削速度方向的

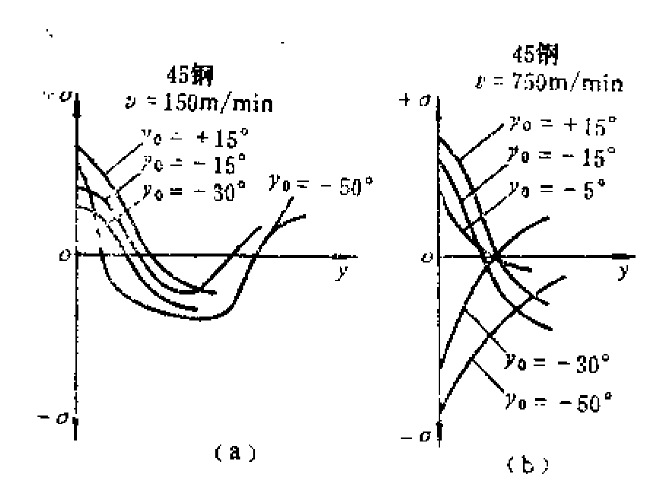


图3-16 车削45钢时前角对表面层残余应力的影响
(a) $v=150m/min$；(b) $v=750m/min$

冷态塑性变形引起的残余应力占主导地位，如图3-16(a)负前角时，由于F_y方向的冷态塑性变形增加，由此引起的残余压应力部分地抵消了残余拉应力，故总的残余拉应力有所降低。当$\gamma_0=-50°$时，表面残余拉应力反而增大，这可能是由于切削温度较高，热塑性变形增大的缘故。如进一步提高v（$v=750m/min$），冷态塑性变形程度减小，但切削温度较高，热塑性变形占主导地位，故表面仍产生残余拉应力。当负前角较大时（$\gamma_0=-30°$和$-50°$），表面层强烈受热而导致淬火，因此表面产生残余压应力，如图3-16(b)。当用不同前角的刀具车削18CrNiMo钢时，其表面残余应力的变化趋势基本上与车削45钢时相同，但由于材料的淬透性较45钢好，故$v=150m/min$、$\gamma_0=-30°$和$v=750m/min$、$\gamma_0=-5°$时表面就出现残余压应力。

图3-17是用不同切削速度车削18CrNiMo和45钢时表面层残余应力的情况。从图中可知，随着v的提高，表面沿切削速度方向的冷态塑性变形程度减小，故表面残余拉应力也随之减小。再进一步提高v（车削18CrNiMo钢时$v=200m/min$）表面温度超过淬火温度，表面淬火这个因素起主导作用，表面出现残余压应力，v再提高，表面残余压应力也随之增大，如图3-17(a)。但对于45钢，由于淬透性差，不易淬火，即使v高达$850m/min$仍没有造成

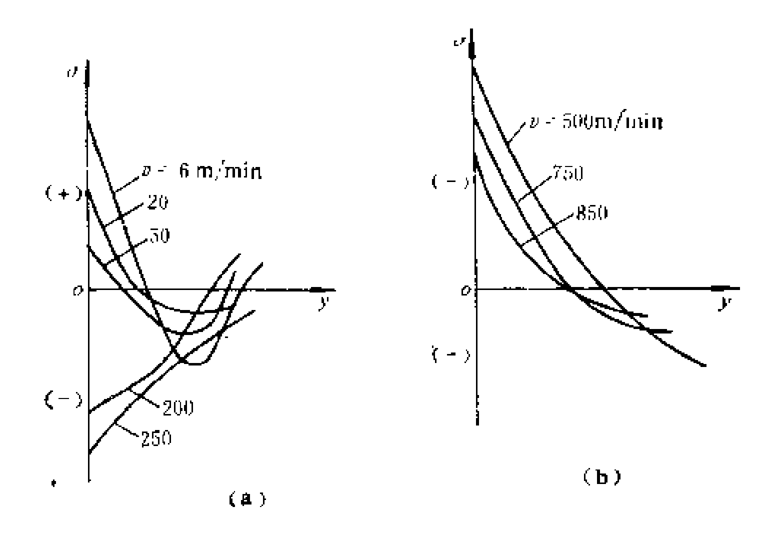


图3-17 切削速度对表面残余应力的影响
(a)车削18CrNiMo钢；(b)车削45钢

残余压应力的条件，故表面始终是残余拉应力，如图3-17(b)。

磨削加工时，切削热对表层残余应力的影响较大。例如磨削45淬火钢时，如砂轮修整较好，冷却又充分，表面层金属会发生二次淬火，表面产生残余压应力。如磨削时不使用切削液，表面层不会产生二次淬火，热塑性变形占主导地位，磨削后表面产生残余拉应力。

磨削用量对表面层残余应力有很大的影响。轻磨削时，产生浅而小的残余压应力，因为这时温度影响很小，更没有金相组织变化，主要是冷态塑性变形的影响起作用。中等磨削条件时产生浅而大的残余拉应力，这是因为热塑性变形起了主导作用的结果。重磨削条件下，表面产生极浅的残余压应力，接着就是较深且较大的残余拉应力。这说明表面产生了一薄层二次淬火层，下面就是过回火组织。

(三)控制残余应力的措施

对于一些精密零件，为了减少残余应力所引起的变形而降低其精度，通常希望零件加工表面没有残余应力，减少和消除残余应力的措施有：

1. 采用精密加工工艺或光整加工工艺作为最终加工工序。由于这些加工方法切削余量小，切削速度极低或极高，切削力、切削热均很小，因此不仅可去除上道工序留下的表面变质层，而且还可避免表面产生残余拉应力。但是必须指出：为了使这些加工工艺达到去除残余应力的效果，要求先行的各工序应合理地选择工具和用量，避免产生过大的表面残余应力。

2. 采用人工时效的方法来消除残余应力。例如精密丝杠可在粗车、粗磨、半精磨后进行三次消除应力处理。

对于在工作中承受交变载荷的零件，为了提高其疲劳强度，要求零件的表面具有残余压应力，这时可用机械的方法和表面热处理的方法在零件表面上制造出残余压应力(常称强化工艺)：

1. 用机械的方法在零件表面上制造残余压应力(图3-18) 它又有多种方法：

(1)滚压强化法。用一个或多个由淬火钢或硬质合金制成的滚轮或钢球，以一定的压力施于已经过热处理和最后机械加工的零件，进行表面加工的过程叫做滚压强化法，如图3-18(a)所示。零件表面经过滚压产生塑性变形，不仅可以减小其表面粗糙度，而且还使表面得到

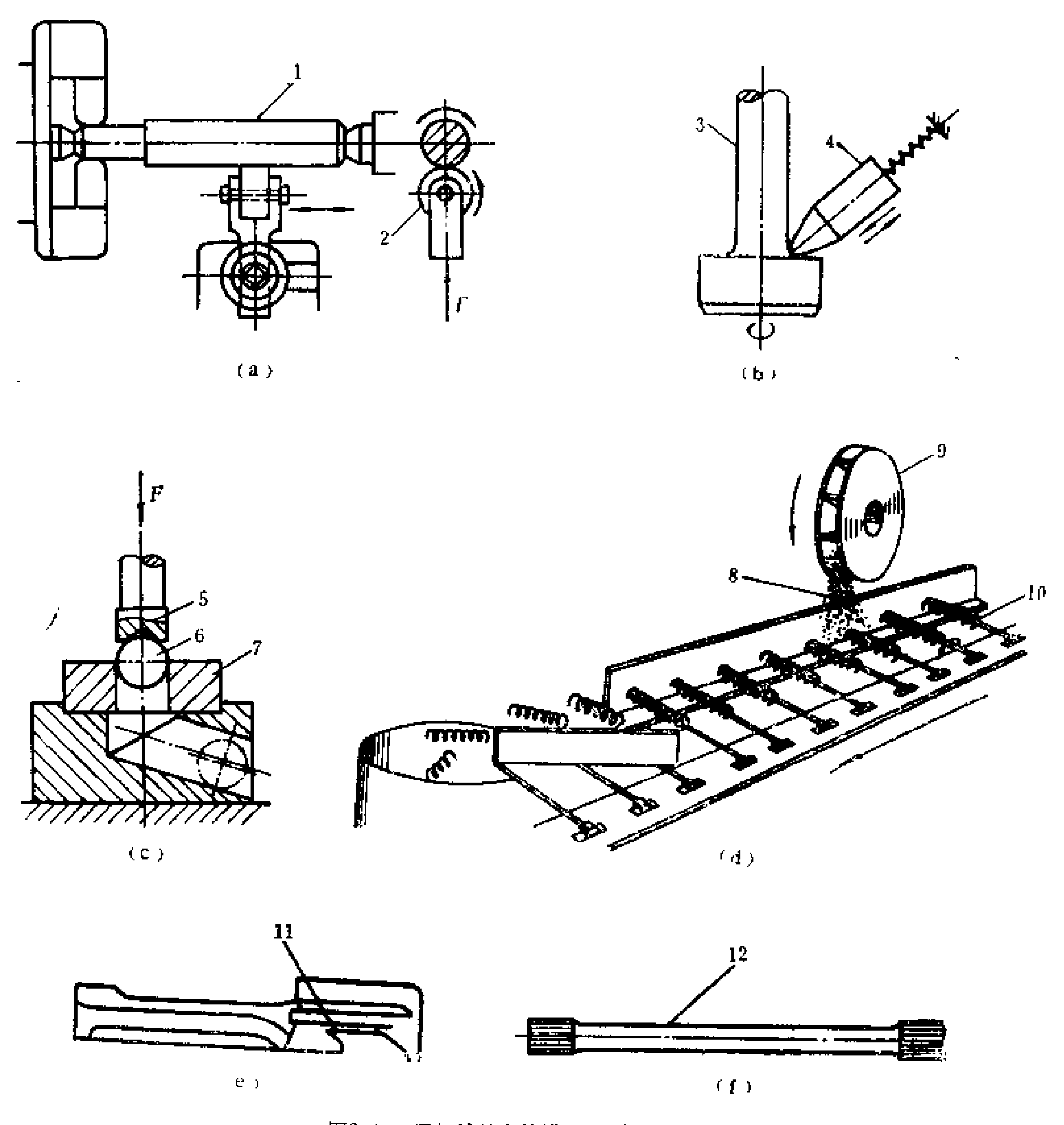


图3-18　用机械的方法进行表面强化
（a）滚压强化；（b）锤击强化；（c）挤压强化；
（d）喷球强化；（e）拉壳钩；　（f）扭力轴
1—轴；2滚轮；3—顶杆；4—锤头；5—冲杆；6—钢球；7—带孔工件；
8—喷球束；9—离心轮；10—弹簧；11—滚压硬化处；12—表面滚压硬化

加工硬化，获得残余压缩应力，因而提高了零件的耐磨性与疲劳强度，同时也减少了应力集中的可能性。

滚压强化法适用于外圆（包括阶梯外圆、过渡圆角、圆槽和锥面等）、内孔和平面的强化。例如56式半自动步枪拉壳钩支持面处的过渡圆角，如图3-18(e)所示；58式14.5mm二联枪架的扭力轴，如图3-18(f)所示，均采用滚压强化法。

（2）锤击强化法。对于某些不便进行滚压强化的零件表面，可采用锤击强化法。图3-18（b）所示为56式半自动步枪顶杆过渡圆弧的锤击强化。

（3）挤压强化法〔图3-18(c)〕。用大于内孔的钢球或冲头挤过内孔，使内孔产生塑性变形，减小表面粗糙度，并获得残余压应力的加工过程叫做挤压强化法。

（4）喷丸强化法〔图2-18(d)〕。用铸铁或钢制的小球（直径为0.4～2mm），使其从喷球器（离心轮或气喷嘴）里以50～70m/s 的速度喷射到已经过机械加工和热处理零件的表面上，由于喷球的冲击作用，使零件表面产生塑性变形，获得残余压应力，这种加工过程叫做喷球强化。喷球强化在武器中常用于弹簧（复进簧）、击锤等零件，以提高其疲劳强度。例如56式轻机枪复进簧，经过喷球强化寿命可提高5倍。

必须指出，为了获得满意的强化效果，必须严格执行强化工艺规范。

2. 用表面热处理在零件表面形成残余压缩应力　由于不同的金相组织有不同的比容，其中马氏体的比容最大，表面热处理后，表层体积增大产生残余压缩应力。常用的表面热处理有高频淬火及渗碳淬火等。

应当指出，当前强化工艺种类较多，由于教材篇幅所限，在此不能详述，届时请参阅有关专著。

第四章　结构工艺性

第一节　概　　述

结构工艺性是指所设计的产品及其零部件的结构，在保证使用要求的前提下，根据已定的生产规模，能用生产率高，劳动量小，材料消耗少和生产成本低的方法将其制造出来的性质。具有这一性质的结构，就是结构工艺性好，反之，则是结构工艺性不好。保证产品及其零部件具有良好的结构工艺性，是设计者在设计产品时要解决的重要问题之一。

影响结构工艺性的因素有以下三个方面：

1．生产类型　产品零件的制造工艺和方法，与该产品的生产类型有关。生产批量小时，大都采用生产率较低的通用设备和工艺装备，以及一般制造方法，因此，产品及其零部件的结构必须与这类工艺、设备和工艺装备相适应。而生产批量大时，产品及其零部件的结构就必须与采用高生产率的工艺、设备和工艺装备相适应。

图4-1所示为阶梯轴的加工情况。在单件或小批生产时，通常选用普通车床加工，图4-1(a)

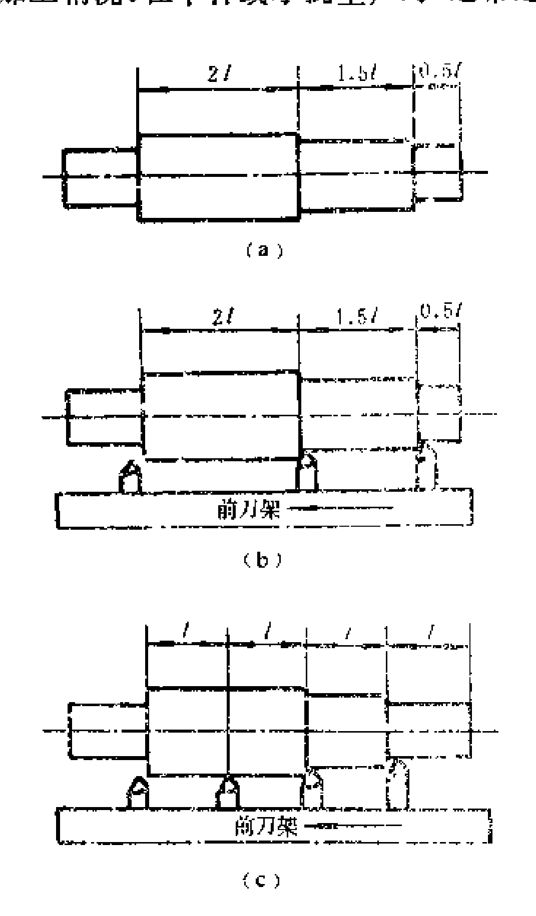


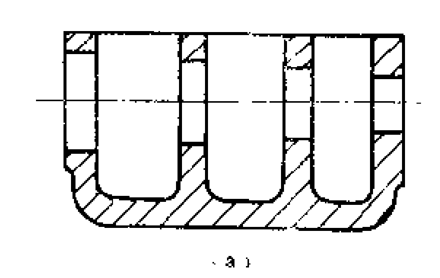
图4-1　阶梯轴的加工

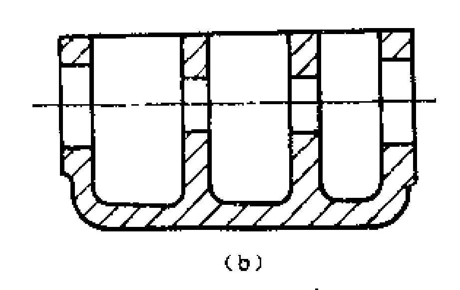
(a)工艺性好(单件小批生产)；(b)工艺性不好(大批量生产)；

(c)工艺性好(大批量生产)

所示的结构没有什么不合理的地方，即结构工艺性较好。但在大批量生产时，通常采用生产效率高的多刀机床进行加工〔见图4-1(b)〕，由于车刀刀架行程增加，此时原方案的工艺性就不够好。在不影响该轴使用要求的前提下，如将各阶梯段的长度改为相等或接近l的整数倍，以便将车刀按l的间距设置，刀架移动l即可完成走刀，故其结构工艺性较好，如图4-1(c)所示。

图4-2所示为箱体零件上四个同轴孔的两种分布情况。在单件、中小批生产时，一般均用普通卧式镗床进行加工。图4-2(a)所示的结构，可在一次安装中从一面把四个孔镗出来，因此，其结构工艺性是好的。而对于图4-2(b)所示的结构，用普通卧式镗床从一面镗





(a)　　　　(b)

图4-2　箱体零件同轴线孔分布

(a)孔径向同一方向递减；　(b)孔径从两边向中间减小

孔，需要两次安装，或用回转工作台转位来进行加工，所以这种结构工艺性就不好。而在大批大量生产中，常采用双面组合镗床进行加工，则图4-2(b)所示结构，可在一次安装中从两面各加工两个孔，其结构工艺性较好；而对于图4-2(a)所示的结构，左边的镗杆要加工三个直径不同的孔，右边镗杆只能镗削最右边的一个孔，这样不利于高生产率机床能力的发挥，所以结构工艺性就不好。可见，结构工艺性与生产类型密切相关。

2．制造工厂的生产条件　工厂的生产条件包括：工厂的生产设备情况（锻造所能达到的最大尺寸，铸造毛坯的最大质量，机械加工所能加工的最大轮廓尺寸等等），技术人员及生产工人的技术水平，辅助部门的技术力量等等。显然，当具体生产条件不同时，原来具有良好工艺性的结构，也可能变为工艺性较差的结构。例如某些大型零件的加工，需要大型设备，而工厂又没有这种设备，造成无法加工，这就需要改为组合结构或改变生产条件，以满足加工的需要。否则这种大型零件的工艺性很差。又如在图4-2(b)中所示阶梯孔结构，适用于大批大量生产，若工厂虽属大批生产，但无双面组合镗床，则这种孔的结构仍然是工艺性不好的结构。当然，工厂的生产条件与生产类型密切有关，但它是变化的，为促进生产发展，应根据需要去改造生产条件，而不为条件所束缚。

3．工艺技术的发展　机械制造工艺方面的新加工设备与新工艺方法的不断涌现，使结构工艺性也随之不断发生变化。

图4-3所示为柴油机离合器内齿轮及其加工示意图。其中图4-3(a)为有越程槽的内齿轮，可用插齿加工，但加工时间较长；图4-3(b)为没有越程槽的内齿轮，可用电解法加工〔见图4-3(c)〕。这样，既提高了内齿轮齿的承载能力，又使加工时间大大缩短（一般只需4分钟），生产率大大提高。没有越程槽，从切削加工来看，是不能加工的；但从新工艺——电解加工来看，却是工艺性良好的结构。

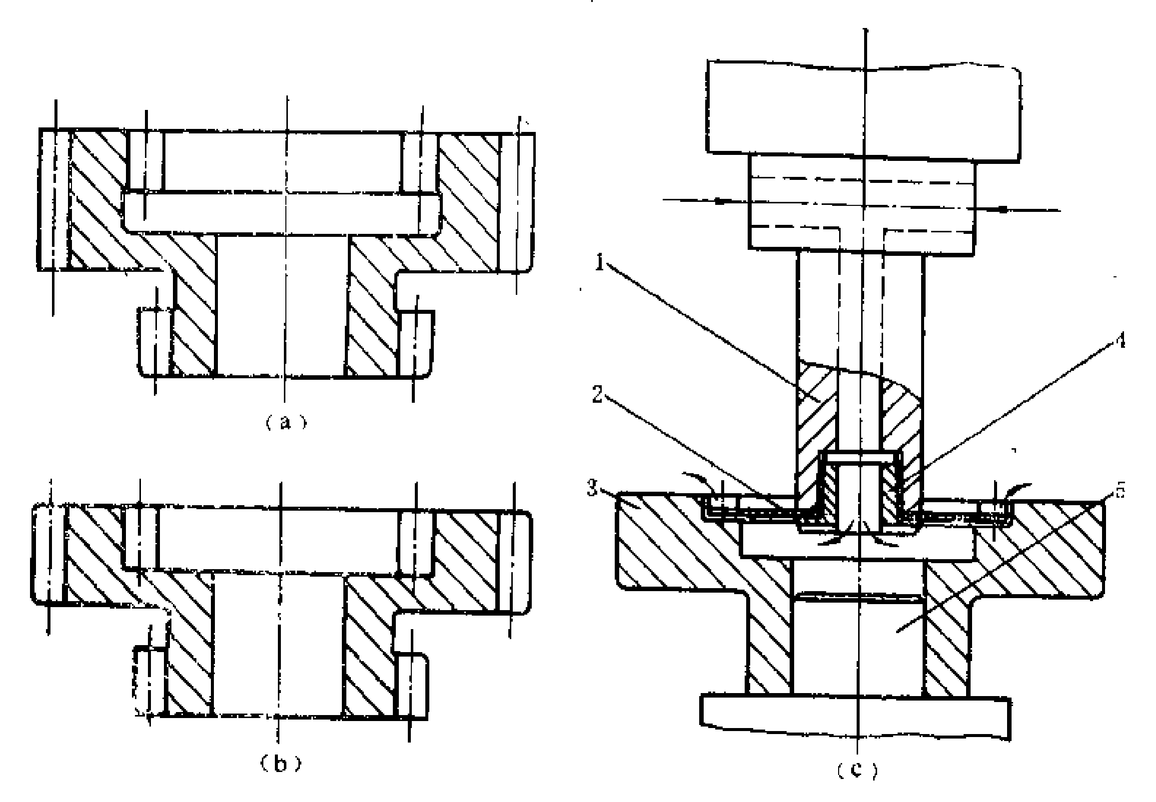


图4-3 离合器内齿轮及其电解加工示意图

（a）内齿轮有越程槽；（b）内齿轮无越程槽；（c）电解加工内齿形

1—阴极体；2—阴极片；3—工件；4—空心螺钉；5—定位心轴

目前机床中常见的滚珠丝杠，在几十年前便有了，但由于当时制造工艺水平的限制，认为是工艺性差的结构，可是近二、三十年来，制造滚珠丝杠的工艺已被人们所掌握，使这种先进的传动方式在许多机器设备上得到广泛应用。

随着无屑加工、电加工、激光加工、电子束加工、超声加工等许多新加工工艺的出现和不断完善，对那些难加工材料（如硬度高）、复杂形面、精密微孔等的加工，曾认为是不易实现或不可能的，现在则变得较为容易和方便了。

一个设计者，不但要懂得结构工艺性是随上述因素而变化的，而且为了要解决好产品设计中的结构工艺性问题，还应注意以下三点：

1．在产品设计中，设计人员应有整体观念，要全面地、综合地考虑问题。这就是说，要从整个产品或部件着眼，而不应只孤立地看到某个零件；既要考虑零件的结构工艺性，又要考虑整个产品的结构工艺性；要从零件的整个制造过程出发，而不是只看到零件的某一制造过程。实践证明，产品中各零件具有好的工艺性，而整个产品的结构工艺性并不一定好。

2．设计人员要具备比较全面的工艺知识。设计产品时，在满足使用要求的前提下，设计者应千方百计从工艺上考虑问题。对工艺方面的问题考虑得愈周到，所设计的结构就愈富有生命力。工艺性好的结构，有利于保证产品质量，提高劳动生产率，降低生产成本，对国民经济的发展有着很大的意义。

3．设计人员要与工艺人员进行密切合作，多听取工艺人员、老工人的意见，以改进所设计的产品及其零部件的结构。对重要的、大批量生产的零部件，在初步设计以后，均应经过工艺性审查，以提高设计质量，使之更符合工厂的生产条件，并易于制造。

结构工艺性通常包括产品的结构工艺性和零部件在制造、装配、维修过程中的工艺性，例如铸造工艺性、锻造工艺性、冷冲压工艺性、焊接工艺性、机械加工工艺性、热处理工艺性、表面处理工艺性、装配工艺性及修理工艺性等等。为了突出本课程所要求的重点，下面仅对产品的结构工艺性、切削加工零件的结构工艺性及零部件结构的装配工艺性三个部分进行论述。

第二节 产品（武器）的结构工艺性

产品的结构工艺性，目前还没有一套评定它的完善标准。一个具有良好结构工艺性的产品，在设计时应合理解决好以下七个方面的问题：

1．应使产品总体结构合乎优化原则，传动链短，零件数目少

产品中的传动链短，结构简单，零件数目少，可以节省材料，减轻重量，减少累积误差，便于保证精度，使制造、使用与维修简便，使生产经济性和使用可靠性得到提高。在自动武器设计中，为了减小质量，增加可靠性，常将若干功能集中于一个零件上，使零件数目减少。不过这也增加了零件及其制造的复杂性。所以不能将零件总数减少绝对化，否则会使零件结构过于复杂，增大制造的难度和费用，从而影响了经济性。因此对于那些结构复杂、难于制造的零件，把它分成形体简单的若干个零件，也是常有的事。

2．充分利用原有的结构，注意“继承性”

在设计新产品时，要充分利用原有的结构，注意“继承性”。原有的结构，往往都经过长期的使用和制造的考验，一般来说，工艺性都比较好，而且已进行过生产，有现成的工艺装备和工艺文件，因此，采用原有结构，可以大大简化生产准备工作，缩短试制生产周期，加速产品的更新换代，降低生产成本，提高产品的竞争能力。

例如苏联的АК-47突击步枪，经改进后为АКМ；РПД轻机枪经改进后为РПК。РПД与АК除所用枪弹相同外，结构上没有共同之处。АКМ与АК的主要部分完全相同，而РПК选取与АКМ相同的主要机构，即注意了“继承性”，所以РПК与АКМ两种枪大部分零件可以互换。

我国81式枪族（步枪与轻机枪），两种枪的主要机构相同，其自动机、发射机、复进机、导气装置和供弹具均可互换使用，有65种零件可以通用，同时有相当一部分零件是与当前工厂生产的武器零件相类似。

3．贯彻好标准化、系列化、通用化的要求

标准化是组织现代化生产的重要手段，是科学管理的重要组成部分。推行标准化是国家一项重要的技术政策。

标准可分为三级：国家标准（GB）、部标准（专业标准）和企业标准。

在机械工业中，标准化的内容，除了产品质量标准外，在结构设计上主要有以下四个方面：

（1）机械制造一般规范的标准化规格化。例如制图、材料、尺寸、公差与配合、表面粗糙度等等。

（2）通用零件、元件及部件的标准化规格化。例如螺栓、螺钉、螺母、垫圈、销子、铆钉、轴承等等。

（3）结构要素的标准化规格化。对于各种非标准零件，为了设计工作本身的统一，加快设计进程，同时方便加工制造，其结构要素是有必要进行标准化规格化的。例如中心孔、T形槽、燕尾槽、退刀槽、倒角、圆角半径、滚花、螺纹等等。

（4）毛坯设计中的工艺规格化。例如铸件的结构要素：最小壁厚，铸件壁的连接与过渡的形式和尺寸、铸造内圆角、铸造外圆角、过渡斜度、结构斜度、加强筋的种类和尺寸、加强筋的布置及形状等等。又如冲压件的结构要素：最小可冲孔尺寸，最小冲裁圆角半径，孔边距，孔心距，最小弯曲半径，弯边最小高度等。

上述标准与规范，在设计中应该认真遵守，应按照这些标准与规范进行设计制图，而不应随意自定。

系列化是指产品按大小分档，进行选优，成系列地发展，用较少的品种规格以满足国防与国民经济的广泛需要。目前，我国武器系统口径的选定，枪族的发展，就是系列化方面所取得的成绩。

通用化就是使同类机型的主要零部件，特别是易磨损件，用统一和减少种类的办法来消除其过分的多样性，以便做到同类机型的零部件最大限度地通用互换。可见，通用化是更加广义的标准化的一部分，因为它既包括已标准化的，也包括未标准化的项目和内容。

生产专业化是现代大生产的标志。没有专业化就没有大生产。结构标准化，产品系列化和零部件通用化，是专业化协作生产的前提。同时，也只有搞好专业化生产，才能更好地巩固标准化、系列化、通用化的成果，发挥其应有的经济效益。

在设计中应充分考虑"三化"的贯彻，提高零部件的重复率，就能组织成批或大批生产，就可采用较为先进的、高生产率的工艺和设备，使生产率提高，成本降低。

4．充分注意节省原材料和选材的经济性

根据统计，在机械制造中，材料费用要占产品全部制造成本的30～80%，因此，材料费用在很大程度上决定着产品成本。注意原材料的节约是一项非常重要的工作。

为了节约原材料，减少材料费用，在设计产品时，应从下列三方面着手：

（1）减轻产品的净重　减轻武器的质量，提高武器的机动性，是武器的主要战术技术要求之一。为了减轻产品净重，就要合理地确定产品的总体结构，免除不必要的机构和零部件；选用最短的传动系统；简化零部件结构；合理地选用材料和安全系数。

（2）减轻零件的毛重，提高材料利用率　必须使毛坯或型材的形状和尺寸尽量与成品零件相接近，减少加工余量；减少加工面的尺寸和数量，尽量采用高精度的毛坯成型方法。

（3）正确地选择材料　选择材料要立足于国内，要有丰富的来源。在满足使用要求的条件下，尽量选用便宜易得的材料：能用铸铁的不用钢（如用球墨铸铁代替钢），能用碳钢的不用合金钢，能用低合金钢的不用高合金钢，能用黑色金属的不用有色金属，能用塑料的不用钢材，需用合金钢的要尽量不用或少用我国资源短缺的镍铬合金钢；要减少材料的种类与规格，采用最普通的标准牌号和尺寸，使之既满足使用性能要求又规格对号；当一个零件上有多种性能要求或特殊要求时，可采用组合结构，以减少贵重金属的用量，使材料能适应零件加工过程对其所提出的具有良好工艺性的要求。

综上所述，在保证产品质量，注意经济效益和保证良好工艺性的条件下，应充分注意节约材料，使用材合乎经济原则。

5．在满足使用要求的条件下，尽量降低平均精度等级。零件的精度等级愈高，公差愈

小，其加工工时就愈多，制造费用就愈昂贵(见图2-54)。随着加工精度的提高，必须减小表面粗糙度，这也使得加工费用增加，图4-4为表面粗糙度与车削加工费用的关系图。所以，正确地、科学地确定零件的制造公差，使产品及其零件的加工精度定得合理，乃是建立良好工艺性的一个重要条件。在满足使用要求的前提下，产品中要加工的零件尺寸愈少，平均精度等级愈低，表面粗糙度与精度等级相适应，则其工艺性也愈好。

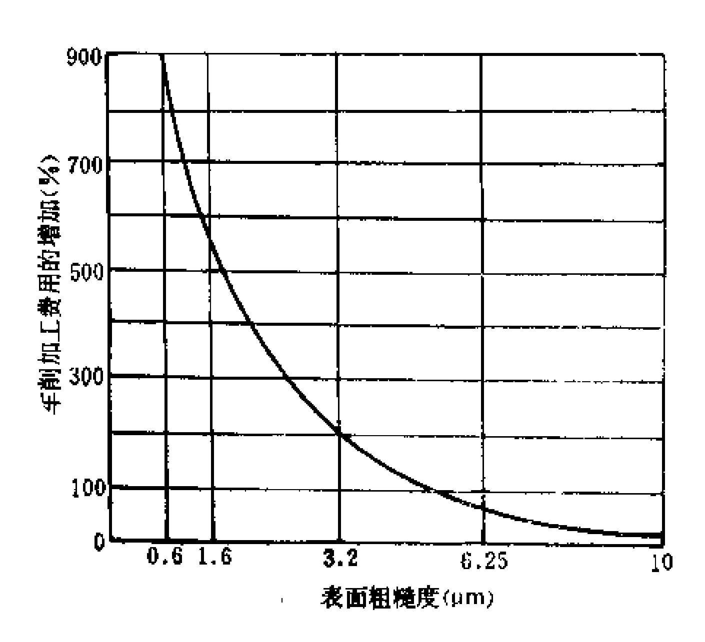


图4-4 表面粗糙度与车削加工费用的关系

6．结构应满足多种工艺性要求

零部件应具有较好的、多方面的工艺性，即毛坯制造的工艺性(铸、锻、冲压、焊接等)、机械加工、热处理、装配以及修理的工艺性，使之既易于保证加工质量，又能获得良好的经济效益。

7．产品及其零件的结构应便于采用先进的、高生产率的制造方法

冷冲压、冷挤压、精密铸造、精密锻造等工艺方法的生产率高，能够使成本降低；强力切削、多刀多刃加工，能提高切削效率；电火花加工、电解加工、电子束加工、激光加工、超声加工等先进加工方法，能解决机械加工中不能加工或难于加工的零件制造问题，不仅能保证质量，提高生产效率，同时有时(如与生产类型相适应)还能降低成本。所以，设计的产品及其零件结构应能满足采用先进的、高生产率的制造方法的要求，并且还应设法提高这些加工方法在整个制造过程中所占的比重。

要提高产品设计的结构工艺性，要解决好以上七个方面的问题。这些问题又不是孤立的，而是相互联系的，所以，在设计产品及其零部件结构时，一定要全面地综合地考虑，合理地解决它们之间的各种矛盾，在保证使用要求的前提下，使其具有良好的结构工艺性。

第三节 切削加工零件的结构工艺性

自动武器上的零件，绝大部分要经过切削加工。改善零件结构的切削加工性，对保证产品质量、提高生产率和降低成本都有特别重要的意义。

一、切削加工对零件结构提出的要求

需要进行切削加工的零件，设计时除应使其满足使用要求以外，还应考虑尽量满足以下六个方面的要求：

1．基准与尺寸标注合理，加工精度与表面粗糙度确定恰当，不需要加工或要求不高的表面，不要设计成加工面或提出较高精度要求；

2．加工表面的几何形状应尽量简单，尽可能布局在同一平面上或同一轴线上；

3．有相互位置要求的各个表面，最好能在一次安装中加工；

4．应能定位准确、夹紧可靠、便于加工、易于测量；

5．结构应与采用高效率机床和先进的工艺方法相适应；

6．应能使用标准刀具和通用量具，减少专用刀具和专用量具的设计与制造。

二、切削加工零件的结构工艺性

切削加工零件的结构工艺性，概括起来有两个方面：零件在尺寸标注、加工精度方面的工艺性和零件在几何形状方面的工艺性。

（一）零件在尺寸标注和加工精度方面的工艺性

零件在尺寸标注和加工精度方面的工艺性，具体是指：如何合理地选择基准和尺寸标注系统；零件的制造精度；零件的表面粗糙度及正确地提出零件材料的技术要求等。

1．合理地选择基准和尺寸标注系统

零件的工艺性在很大程度上决定于选择基准及标注尺寸和公差的正确性。所以在设计零件时，必须考虑设计基准与工艺基准相重合。因为基准重合，在不降低产品质量的条件下，可以得到较大的制造公差。当两者不能重合时，也应考虑到生产工艺的要求，合理地安排这两个基准。零件的定位基准，应有足够的尺寸(大小)以保证在切削加工过程中能可靠地刚性地固定，否则应设计为加工专用的定位基准，即辅助定位基准应有足够的（尺寸大小），如工艺凸台、工艺孔等。为了减少加工量，可考虑保留辅助定位基准（见后面表4-2）。

零件上的尺寸，通常可分为两种：主要尺寸（或称结合尺寸）和自由尺寸（非结合尺寸、未注公差尺寸）。主要尺寸是决定该零件在机器或部件中位置的那些尺寸，以确定该零件在机器或部件中的精确位置，保证其在机器或部件中的工作精度，获得所要求的互换性等。因此，凡是那些能影响产品的工作性能、精度及互换性的重要结构尺寸都属于主要尺寸。自由尺寸所确定的是零件上与其它零件表面不相连接的一些表面，这些尺寸一般是保证：零件的机械性能、物理性能以及其它性能；工艺上的要求（如退刀槽、沟槽、耳座、凸肩等）；构造上、装饰上和质量上的要求以及使用、装配与拆卸的方便等。

标注尺寸的方法，通常有三种：链状法、坐标法和综合法

链状法是从零件某一个基准开始，然后一个接一个地标注尺寸，尺寸呈链状〔图4-5(a)〕。这样标注尺寸，每一段上的尺寸精度，只与本工序产生的加工误差有关，而与以前加工的各个尺寸的误差无关，这是它的主要优点。但是，这种标注，组成环越多，封闭环的误差也越大。链状法常用于某些阶梯状零件，其各段尺寸要求较严格，而总长的尺寸要求不够严格的情况下。此外，要求较高平行度的同轴表面的相互位置尺寸，如箱体中几列同轴孔的平行度，亦可采用链状法，这样，每个环上的误差与其它尺寸误差无关。

坐标法是从一个选定的基准开始标注各个尺寸，如图4-5(b)所示。此种注法封闭环的误差只等于两个组成环误差之和，避免了链状法尺寸误差的累积现象，故各段尺寸的相对位

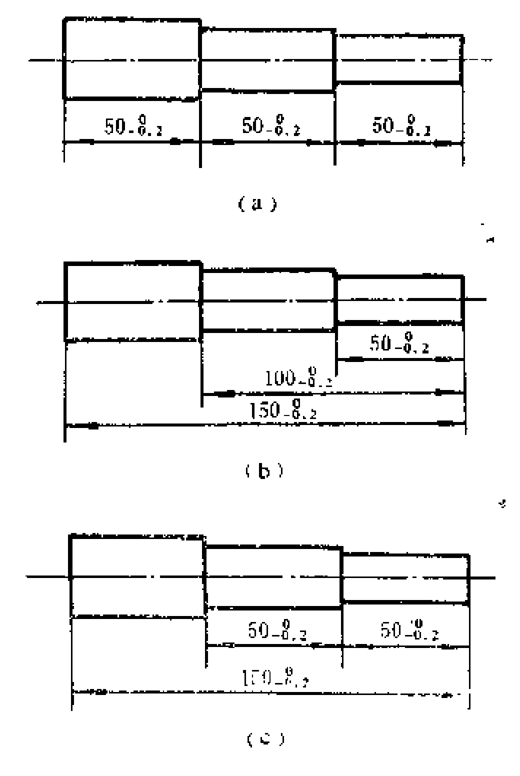


图4-5　尺寸标注的几种方法
(a)链状法；(b)坐标法；(c)综合法

置可以得到很高的精度，这是此种注法的重要优点。此外，由于各个尺寸有一个共同的基准，可以使加工时调整机床方便。但是，如果要求保持多孔中心之间或轴的各台肩之间的精确尺寸时，则不宜用此法，而用链状法较好。

综合法是链状法与坐标法的综合，如图 4-5(c)所示。它是根据零件上各个尺寸的具体要求，分别按两种注法的各自长处进行标注，是广泛采用的尺寸标注方法。图4-6所示为活塞的纵剖面图。其上各环槽的尺寸，原拟按坐标法进行标注，但因活塞环槽的宽度比活塞上其他长度尺寸更为重要，需要直接注出，故采用了综合法。

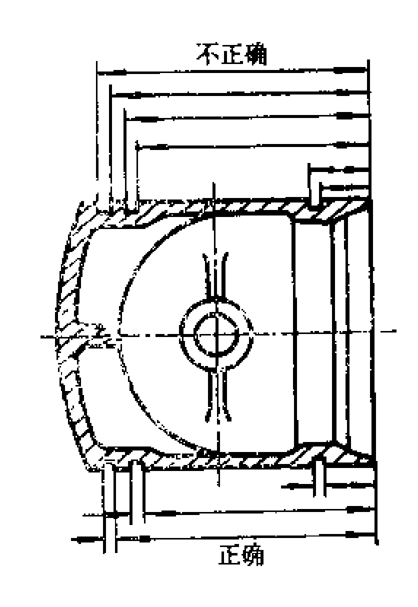


图4-6　活塞环槽尺寸的标注

尺寸标注系统，按其基准选择的不同，可分为三个系统：从设计基准标注尺寸的系统；从工艺基准标注尺寸的系统；综合标注尺寸的系统。

从设计基准标注尺寸的系统，其特征是图上的全部尺寸都是从设计基准注起，即由零件上那些确定该零件在机器中位置的表面（装配基准）注起。这种标注系统主要优点是尺寸链短，可显著地提高产品的精度与质量，同时，对零件、机器上的尺寸易于进行检查、计算和调整。由于这种标注系统没有考虑工艺要求，致使图纸上的一些尺寸常常与制造零件的工艺要求不相适应，因面不得不进行工艺尺寸换算，增加了工艺文件、生产的准备过程、测量工具和制造成本。

从工艺基准标注尺寸的系统，其特征是图上的全部尺寸都从工艺基准注起，即从加工过程中作为定位、测量基准的那些表面注起。这种尺寸标注系统的主要优点是在尺寸标注上反映了生产要求，便于制造，其缺点是对零件和整个产品的尺寸检查和尺寸调整较为复杂。

综合标注尺寸的系统，其特征是一部分尺寸从设计基准注起，而另一部分尺寸从工艺基准注起。既考虑到设计要求，又考虑到工艺要求。对零件的主要尺寸，力求从设计基准出发标注，以保证零件和整个产品的工作质量，而对零件上的其它尺寸，则应从工艺基准注起，以满足生产要求。

实际统计表明，需要从设计基准标注的尺寸其数量是不多的，一般不超过零件尺寸总数的15%。为了保证零件的使用性能良好，这些尺寸的公差都定得比较严格，工艺人员应尽可能地采取必要的工艺措施，重点保证这些主要尺寸和公差的要求。至于其它的大部分尺寸，则应从工艺基准标注。综合标注尺寸的系统，既满足了使用性能要求，又兼顾到制造工艺的方便性，它在尺寸标注中应用得最多。

对于回转体零件主要有回转直径和轴向长度两个方面的尺寸。通常以设计基准——回转表面轴心线作为尺寸标注基准，采用对称标注，回转体零件轴线方向的长度尺寸，则应按主要尺寸从设计基准注起，其它尺寸则按工艺基准注起。在选定了主要尺寸基准后，就应该多从工艺方面加以考虑。由于车削加工时首先加工的是轴的右端面，然后根据这个端面进行挡块、凸轮、组合刀具的调整和对工件的测量，故用车削方法加工时一般可从右端面起标注尺寸，也就是从工艺的调整基准面起标注尺寸，如图4-7所示。在此例中，B面是零件的装配

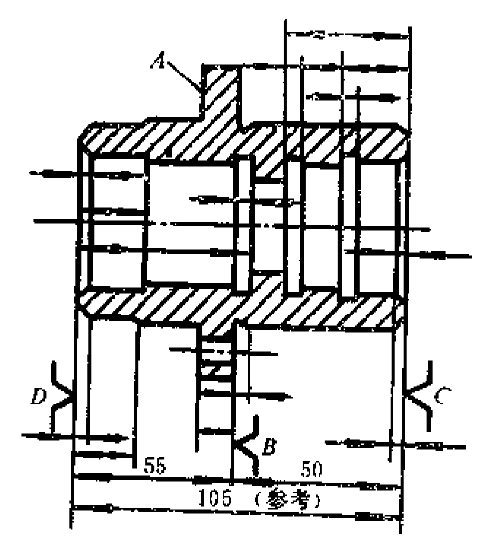


图4-7 法兰凸肩长度尺寸标注

基准（即设计基准），按基准重合原则，选B面作定位精基准，C、D面为加工时的调整基准，用尺寸50和55与B面相联系，然后根据调整基准标注其它尺寸。按照这种尺寸注法，加工时首先根据定位粗基准A加工端面B和C，以C为调整和度量基准加工右部内孔、外圆各表面。然后以B面为定位精基准加工D面，并以D面为调整或度量基准加工左部外圆和内孔中的有关表面。这种尺寸注法使机床和刀具的调整比较容易，也可以用简单的度量工具进行尺寸和误差的检验。

当用棒料在六角车床或自动车床上加工零件时，零件上的尺寸应从右端面标注，因为当棒料送至定位器时，右端面是定位基准。而左端面是切断面，不应以它作为标注尺寸的基准，如图4-8所示。

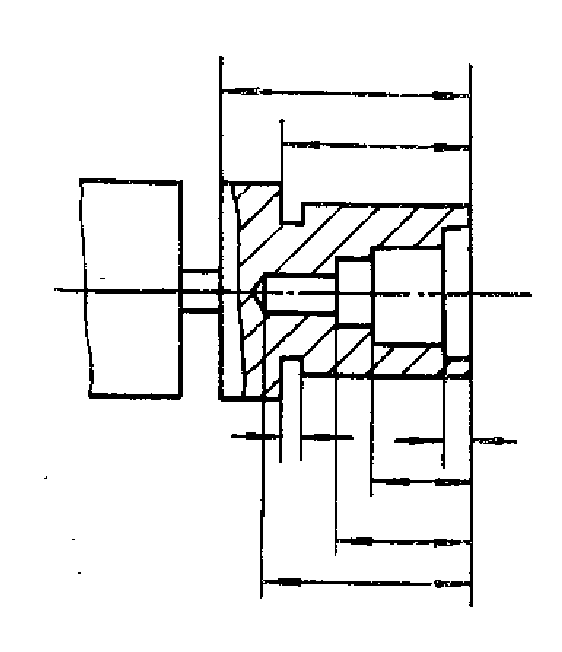


图4-8 在自动车床上加工时尺寸标注示例

当采用高生产率的多刀车床加工阶梯轴时，其尺寸可从定位基准或调整基准进行标注，如图4-9所示。阶梯轴的左端面紧靠在固定支承1上，前顶尖可以浮动，所以该端面是定位基准。若以固定支承为基面控制尺寸，便于安装和调整车刀时，则可用该定位基面作为标注尺寸的基准，如图4-9（a）中的定位基准2。若用固定支承作基面不便于安装和调整车刀时，面轴上又没有重要的结合尺寸，可按坐标法标注。例如加工面和固定支承基面距离较远或测量不便，可改用工件右端面作为标注尺寸的基准，即以它作为车刀的调整基准，如图 4-9(b)所示。也可以用某个轴肩作为标注尺寸的基准，这时用加工该轴肩的车刀来调整其它的车刀，也就是说该轴肩是调整基准，如图4-9(c)所示。这样，刀具调整工作可在刀架上进行，而刀架可以处于任何便于调整的位置。再用尺寸L把定位基准和调整基准联系起来，从而确定了作为调整基准的那把车刀的位置（即整个刀架的位置）。若轴在多刀车床上用两次安装由两端分别加工时，轴的每一端面均为加工其相应一端各尺寸的调整基准。这时轴上有一个结合尺寸4，见图4-9（d），它是尺寸链中的一环，应该直接注出。这种标注是根据设计和工艺两种要求进行标注的。

对于具有对称形状的零件，图上尺寸的标注，一般有两个系统，多数情况下采用从对称轴线标注尺寸，有时也可从零件上实际存在的基准标注尺寸。至于如何选定尺寸基准，则应

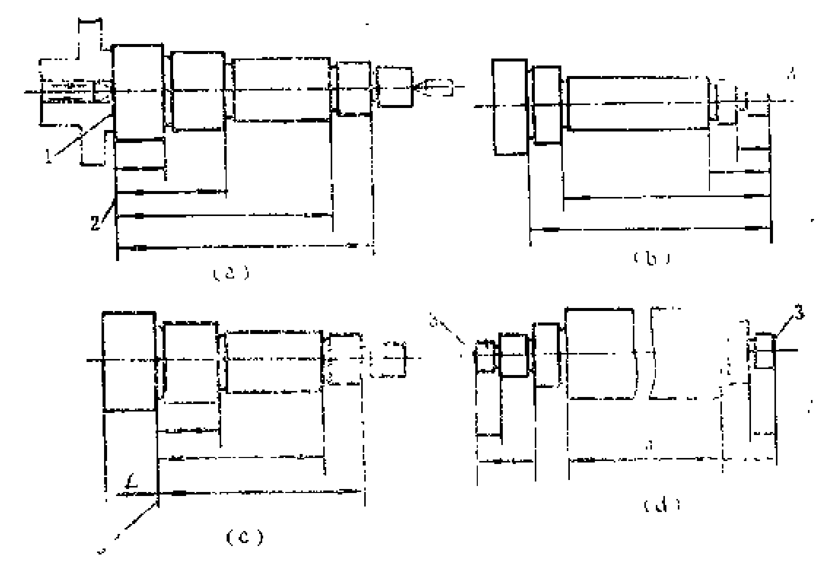


图4-9　在多刀车床上加工阶梯轴的尺寸标注

(a)左端为调整基准；(b)右端为调整基准；(c)某轴肩为调整基准；(d)两端均为调整基准

1—固定支承；2—定位基准；3—调整基准；4—结合尺寸

经过具体分析。零件上的对称面、线和点往往不是实际存在的基准，而是一种抽象的基准，用这些面、线和点作尺寸基准，按照这种基准标注零件的尺寸，比较清晰，使人能迅速、直观地看出零件的对称形状。可是在实际生产中，零件的加工和测量不是根据抽象的基准，而是根据实际存在的基准而来进行的。使用抽象的一些线作为基准，就会使制造零件时定位夹具和测量工具复杂化。

图4-10所示为同一对称零件的两种尺寸标注法。在图4-10(a)中是按抽象的对称线为基准标准尺寸的，这种注法尺寸数较少，图面较清晰，但是在加工时若用专用夹具定位安装，则要求有较复杂的、能自动对中的夹具和量规。所以此种注法用于这样两种情况：一种是零件为单件小批生产，毛坯精度不高，在生产时按划线找正加工；另一种是零件为大量生产，毛坯精度高，采用专用夹具和量规。图4-10(b)为所有尺寸的标注是以实际存在的表面为基准的。这样标注尺寸，在制造零件时，可以使设计基准和工艺基准重合，夹具和量具的结构也简单得多。因此，在很多情况下，特别是在成批生产中，采用以实际存在的基准面来标注尺寸要比以对称轴线来标注尺寸更为有利。这种注法，在毛坯制造精度差时，有可能出现加

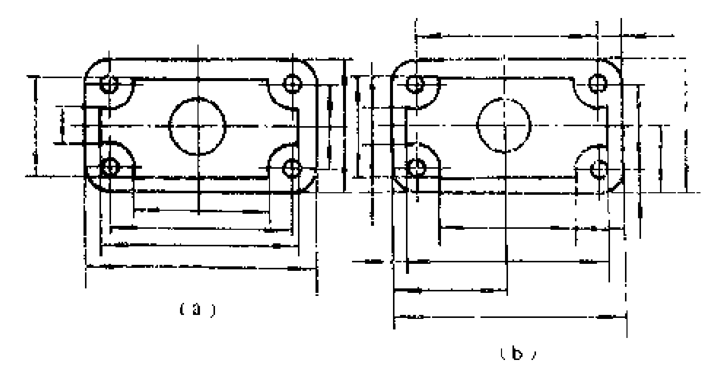


图4-10　在对称零件上标注尺寸

(a)尺寸从对称中心标注；(b)尺寸从实际表面标注

工面与不加工面不对称的情况，即零件装配后会出现与其相结合零件有外廓错位现象，故对毛坯的精度应提出一定的要求。

对于一些外廓复杂、不规则的几何表面所组成的零件，由于这些表面在加工时不能作为良好的工艺基准，它们不能保证方便和准确地定位，因而也就不能保证加工的精度。在此情况下，若零件上具有某种孔，那么孔就是较好的工艺基准，故标注尺寸时应采用孔轴心线作为基准。

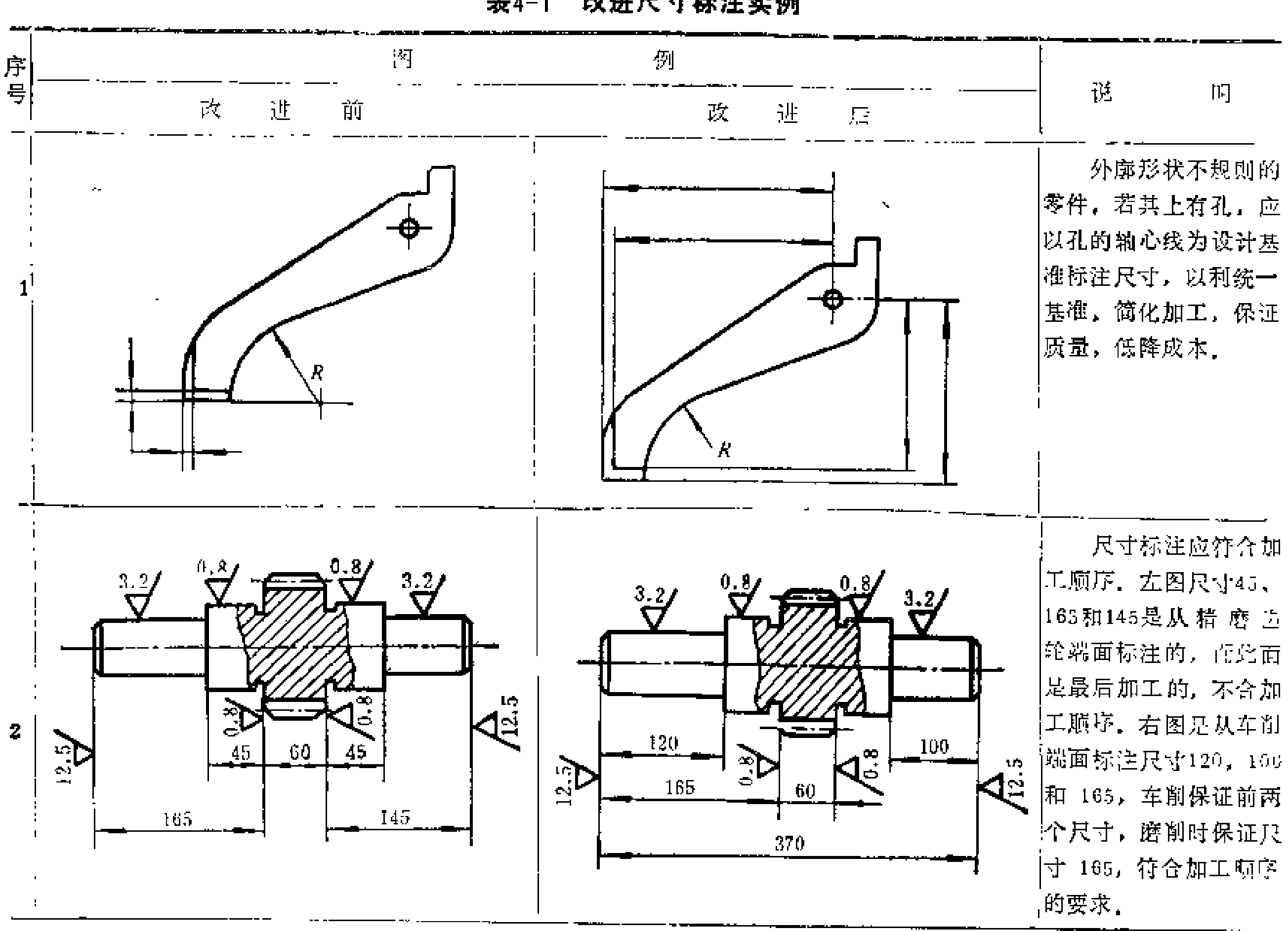
对于具有加工面和毛面零件的尺寸标注，除了要从零件在装配使用中的要求确定设计基准外，还要充分了解零件各个表面的加工方法，使所注的尺寸符合工艺要求。在标注带有非加工面与加工面的零件尺寸时，应该把各个非加工面之间的相互位置尺寸直接标注出来，而非加工面与加工面之间只能有一个联系尺寸。

以上已就几个类型的零件尺寸标注作了说明。在标注各种零件的尺寸时，要从工艺方面考虑的问题还很多，例如所标注的尺寸要符合加工顺序；要尽量从实际存在的基面标注尺寸，而不从那些抽象的面、线和点标注尺寸；当零件上的复杂表面用组合刀具进行加工时，其尺寸的标注要便于组合刀具的组合和调整，等等。

总之，设计人员应对所设计的零件加工工艺有所分析，对零件主要表面的加工方法和定位夹紧方法有所预计或要求，从而尽量使设计基准与工艺基准统一起来。如果设计人员对零件加工时预计采取的工序以至于工步的顺序有一个明确的概念，那末就有可能使图纸上所标的尺寸符合加工路线。

表4-1所示为改进零件工作图的尺寸标注以适应加工工艺要求的实例。

表4-1　改进尺寸标注实例

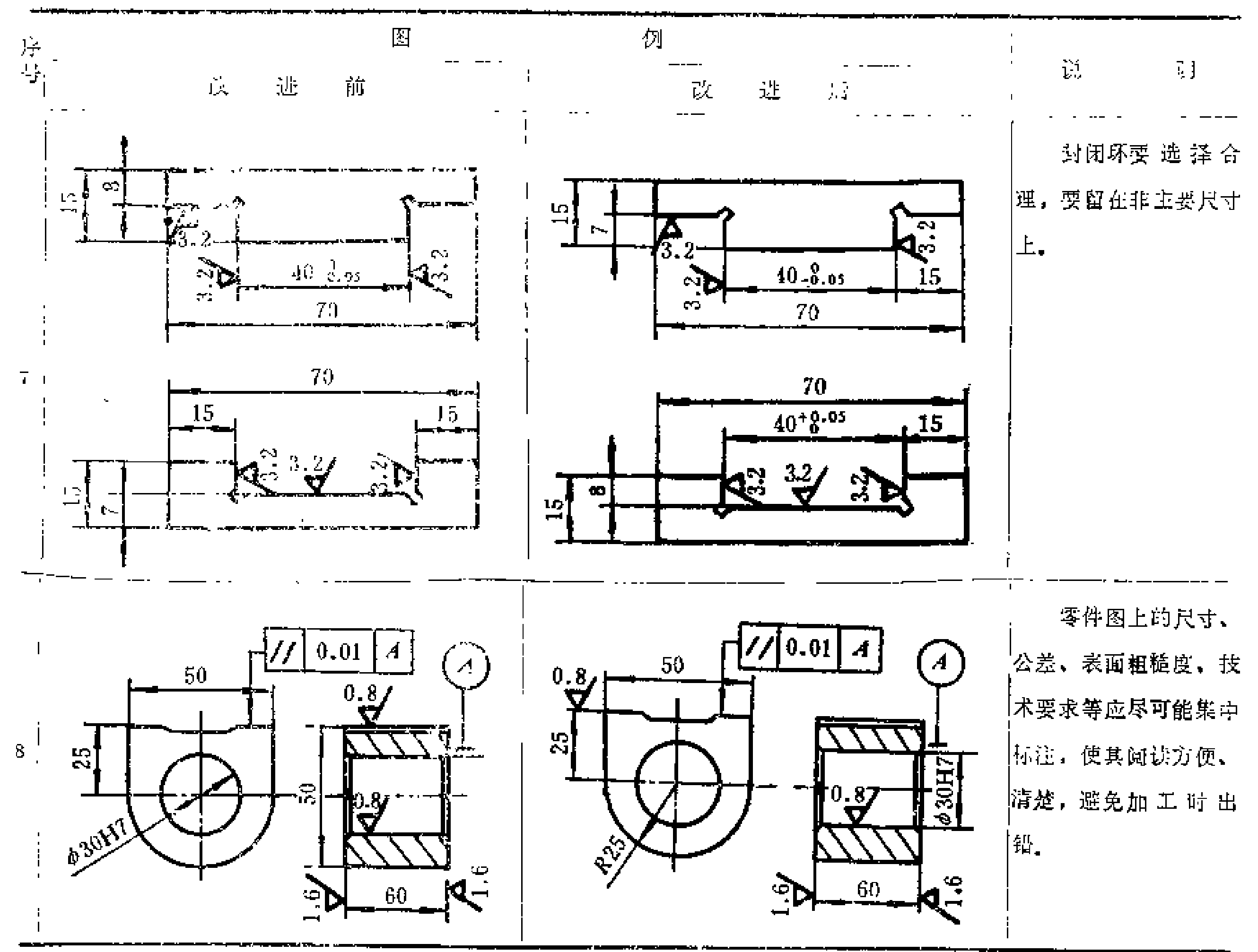


序号	图例：改进前	图例：改进后	说明
1			外廓形状不规则的零件，若其上有孔，应以孔的轴心线为设计基准标注尺寸，以利统一基准，简化加工，保证质量，低降成本。
2			尺寸标注应符合加工顺序。左图尺寸45、165和145是从精磨齿轮端面标注的，但齿面是最后加工的，不合加工顺序。右图是从车削端面标注尺寸120，100和165，车削保证前两个尺寸，磨削时保证尺寸165，符合加工顺序的要求。



序号	图例：改进前	图例：改进后	说明
3			加工面与毛坯面的关联尺寸，在一个坐标方向上只应标注一个。因为毛坯本身的尺寸误差大，一个加工面难以同时满足几个毛坯面的尺寸关系。
4			尺寸标注应满足加工的实际要求，箱体上的孔不仅要注出孔距调整尺寸，而且要注出加工时所需的坐标尺寸。
5			尺寸标注应考虑检验和测量的方便，分别注出不同直径的钻削深度。
6			零件上的尺寸不应从抽象的基准进行标注，而应根据实际存在的基面进行标注，以简化夹、量具，便于制造，易于保证质量。

续表



序号	图例：改进前	图例：改进后	说明
7			封闭环要选择合理，要留在非主要尺寸上。
8			零件图上的尺寸、公差、表面粗糙度、技术要求等应尽可能集中标注，使其阅读方便、清楚，避免加工时出错。

2．合理地选择零件的制造精度

选择零件的制造精度，不仅要满足产品的使用要求，同时还应考虑到在生产实际中的可能性与经济性。

通常零件的制造公差，在满足产品技术要求的前提下，应该尽量取大些。对产品的主要零件及其主要表面，加工精度一般取得高些，对于次要零件及次要表面，加工精度一般偏低。这样，既可保证产品的正常工作，又不降低产品的精度和使用质量，还可使生产成本下降。

图纸上所规定的零件制造精度，应是该零件所用加工方法的经济加工精度，而这些加工方法可能达到的制造精度，只有在特殊情况下才采用。

与选择加工精度有关的还有一个基准制与配合性质的选择问题。由于加工精确的孔所需的劳动量比加工同样精度的轴的劳动量大，且所需的刀具和量具也较多，所以，一般机械制造、枪炮制造中几乎均采用基孔制。只有采用外圆不经切削加工的冷拉钢材做轴时或在同一基本尺寸的轴上需要装上不同配合性质的零件时以及滚动轴承外环直径等特殊情况下，才采用基轴制。

各种配合的选择，可参阅《机械工程手册》。由于武器工作、使用条件的特殊性，有极小一部分重要配合虽然公差等级符合国家标准，但配合是特殊的，间隙增大了，例如56式轻机枪上的机匣与枪机的配合为20.28H12/19.9h10。

3．合理地选择零件的表面粗糙度

零件的表面粗糙度对产品及零件的使用性能与寿命有很大关系。但是，随着表面粗糙度的减小，特别是减小到$Ra1.6$以下时，加工费用便急剧增加。因此，必须根据零件的工作条件规定必要而合理的表面粗糙度。

在确定零件表面粗糙度时，常会遇到两种情况：一是不考虑零件的制造精度，只对表面粗糙度提出较高的要求，例如装饰性外表面、手柄、手轮等；二是必须考虑零件的制造精度，即零件的表面粗糙度必须与零件的制造精度等级相适应，不能规定高的零件制造精度而采用大的表面粗糙度。

在第三章已详细讨论了表面粗糙度对零件使用性能的影响。选择零件表面粗糙度时，其大小应选择恰当。通常，在同一零件上，工作表面的粗糙度应小于非工作表面；摩擦面的相对速度愈高，单位面积的压力愈大时，则表面粗糙度应愈小；受循环载荷时，特别是在零件圆角处，粗糙度应取较小的数值；要求配合性质稳定可靠时，粗糙度也应取较小的数值。确定零件表面粗糙度的数值时，应考虑所用加工方法能够达到的数值，同时还应考虑采用该精度等级所对应的表面粗糙度范围的下限。

对于塑性较好的材料，不应提出过小的表面粗糙度要求，否则不易达到，故对粗糙度的要求还要与所选的材料相适应。例如含碳量小于0.3%的碳素结构钢，表面粗糙度Ra不应小于1.6，如需更小的粗糙度数值时，则应采用含碳量高的钢，或提出渗碳淬火加磨削的方法。

4．正确地提出对零件材料的技术要求

零件所要求的硬度应与所用材料牌号及热处理方法相适应。例如尽量不对低碳钢提出高硬度（淬火）要求或对中碳钢提出渗碳淬火等。此外，零件材料硬度的确定，固然要根据零件的工作条件与使用性能的要求，但也必须考虑到工艺上的可能性。例如对某些有回火脆性的合金钢，其硬度值应避开有回火脆性的回火温度区所对应的硬度，否则，材料所具有的那个硬度却带有回火脆性。

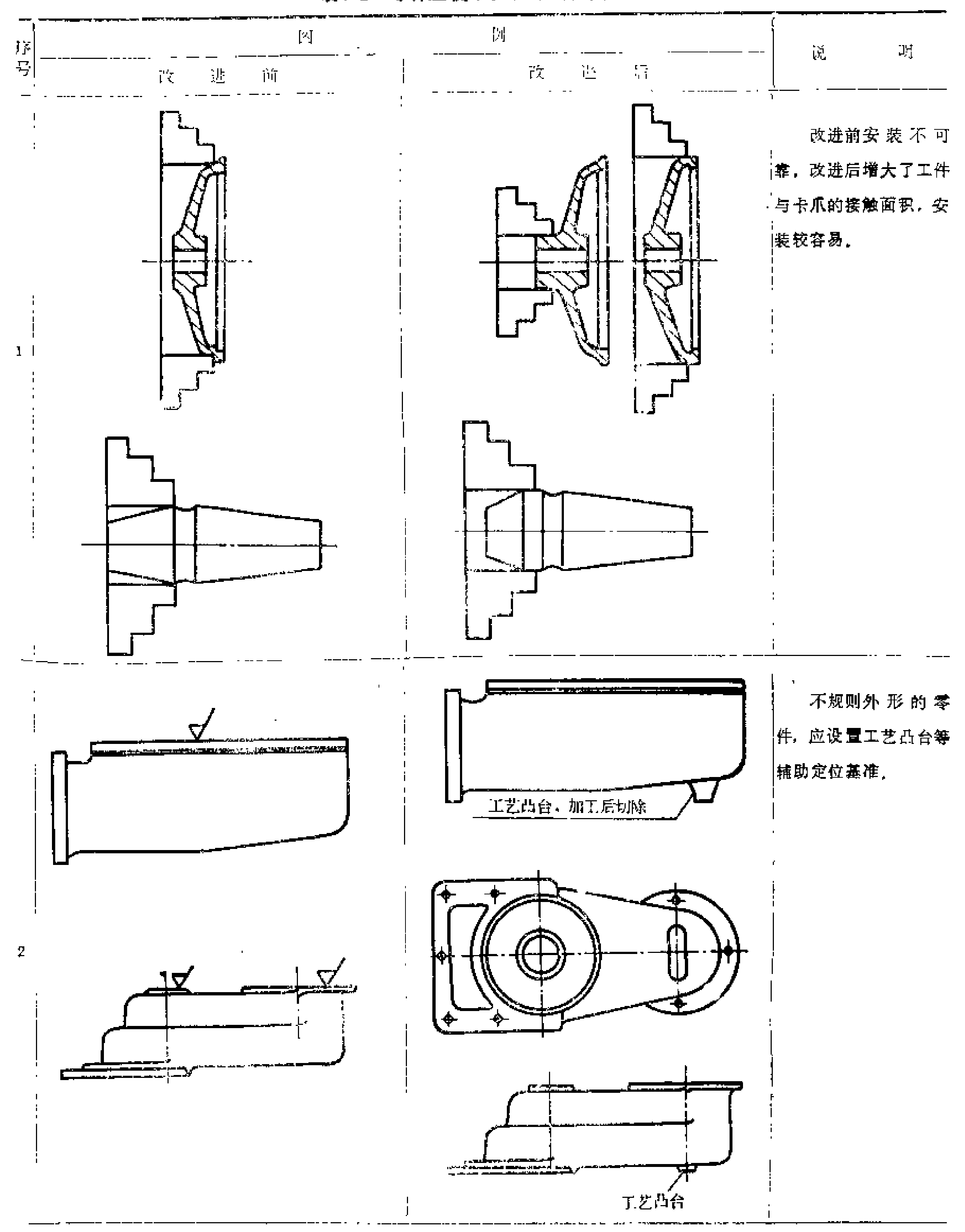
（二）零件在几何形状方面的工艺性

零件的几何形状是多种多样的，例如有壳体和箱体类零件、轴类零件、套筒类零件、杠杆类零件、齿轮和皮带轮类零件等等，各类零件有各类零件的工艺性要求。每类零件表面又是由：平面、圆柱面（孔及外圆）、螺旋面（螺纹）、成形面、旋转端面、槽面、倒角及内圆角表面等多种表面构成。各种基本表面又有它各自的工艺性要求。因此本书把不同类零件的工艺性及其基本表面的工艺性要求综合起来，归纳为四个问题：有利于提高切削效率；便于加工，简化切削；尽量减少切削加工量；便于保证零件精度等，下面分别讨论之。

1．零件的结构应有利于提高切削效率

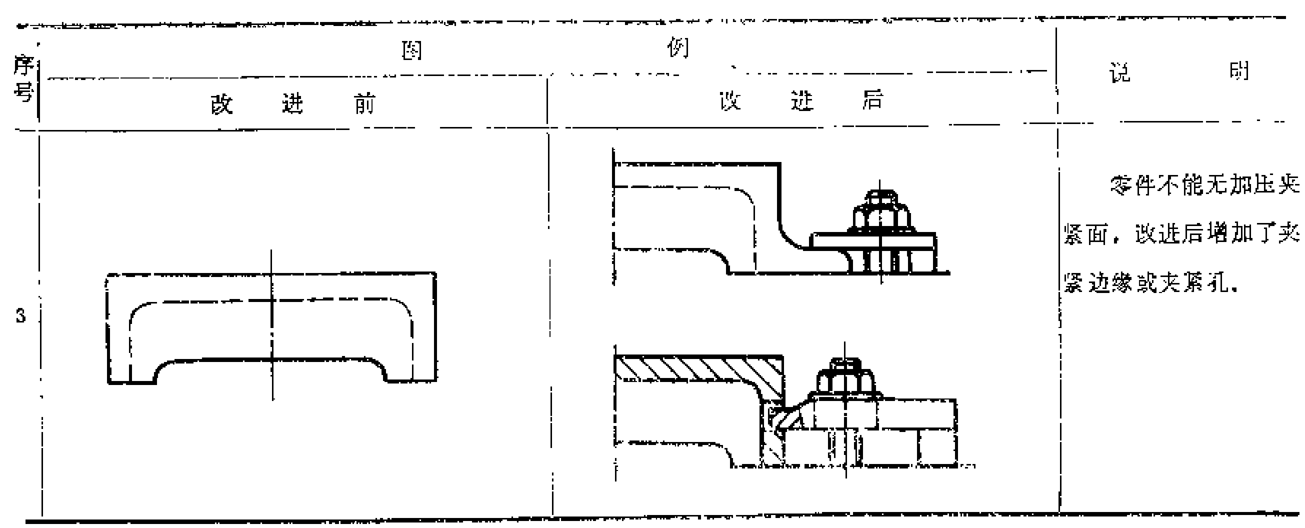
（1）零件应便于在机床或夹具上安装，应有安装基面（见表4-2）

表4-2　零件应便于在机床或夹具上安装



序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
1			改进前安装不可靠，改进后增大了工件与卡爪的接触面积，安装较容易。
2			不规则外形的零件，应设置工艺凸台等辅助定位基准。


续 表



序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
3			零件不能无加压夹紧面，改进后增加了夹紧边缘或夹紧孔。

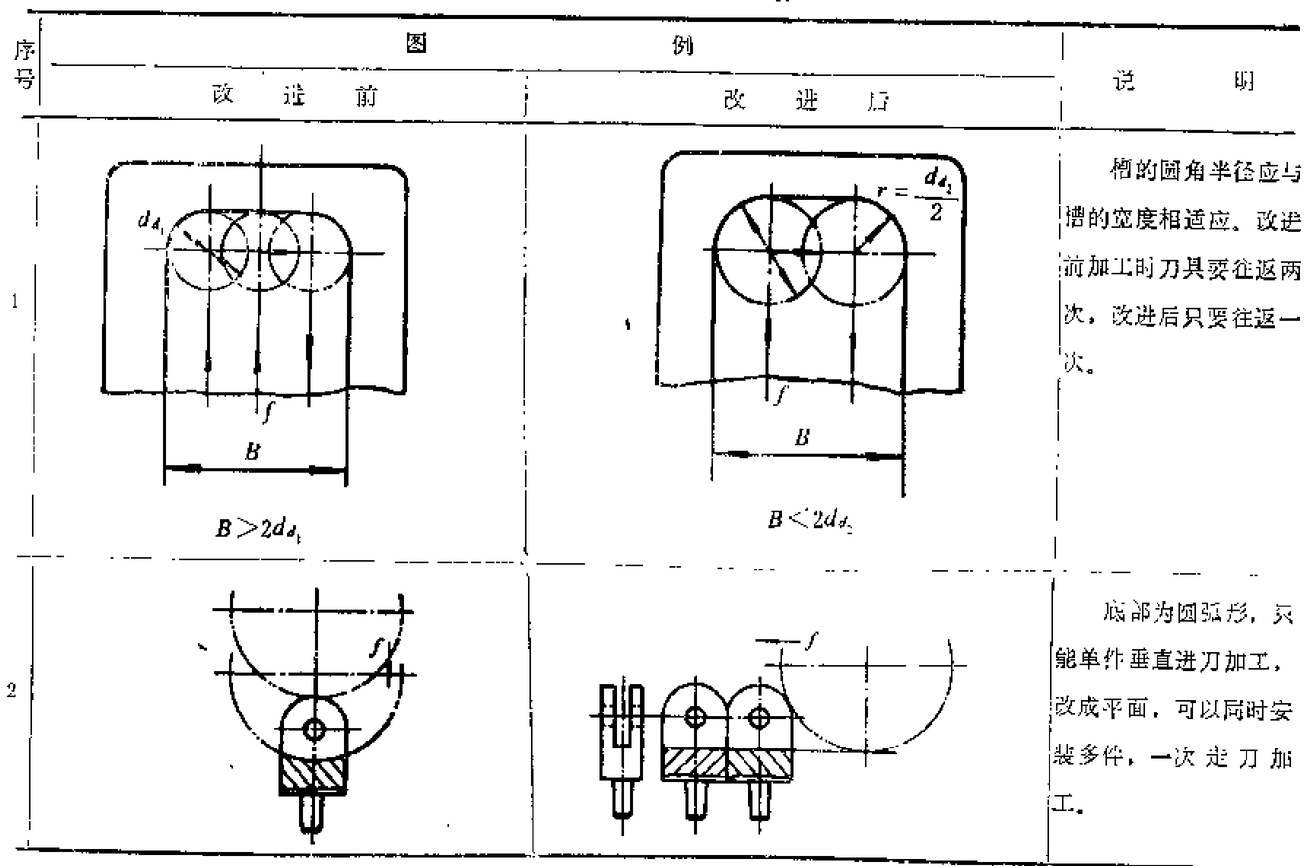
（2）零件的结构应能减少安装次数（见表4-3）

表4-3 减少零件的安装次数

序号	图例		说明
	改进前	改进后	
1			尽可能避免倾斜的加工面，改进后只需一次安装。
2			不通孔改为通孔，可减少安装次数，保证孔的同轴度，便于加工。
			原设计须从两端进行加工，改进后可省去一次安装。

（3）零件的结构应能减少走刀次数（见表4-4）。

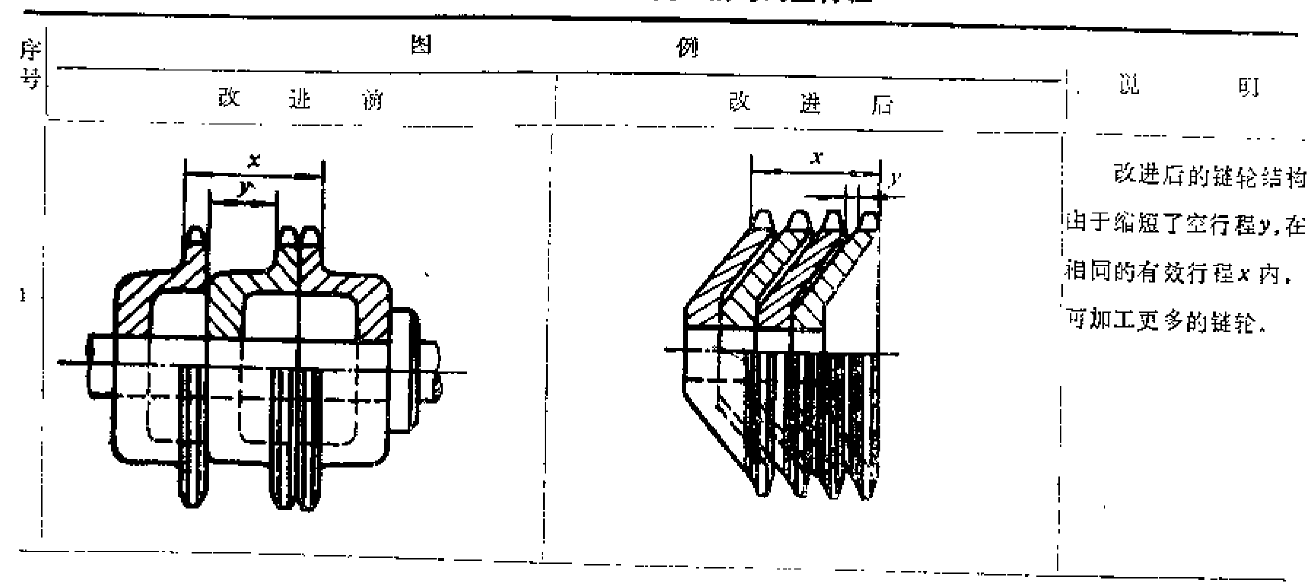
表4-4　减少走刀次数



序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
1	$B > 2d_{d_1}$	$B < 2d_{d_2}$	槽的圆角半径应与槽的宽度相适应。改进前加工时刀具要往返两次，改进后只要往返一次。
2			底部为圆弧形，只能单件垂直进刀加工，改成平面，可以同时安装多件，一次走刀加工。

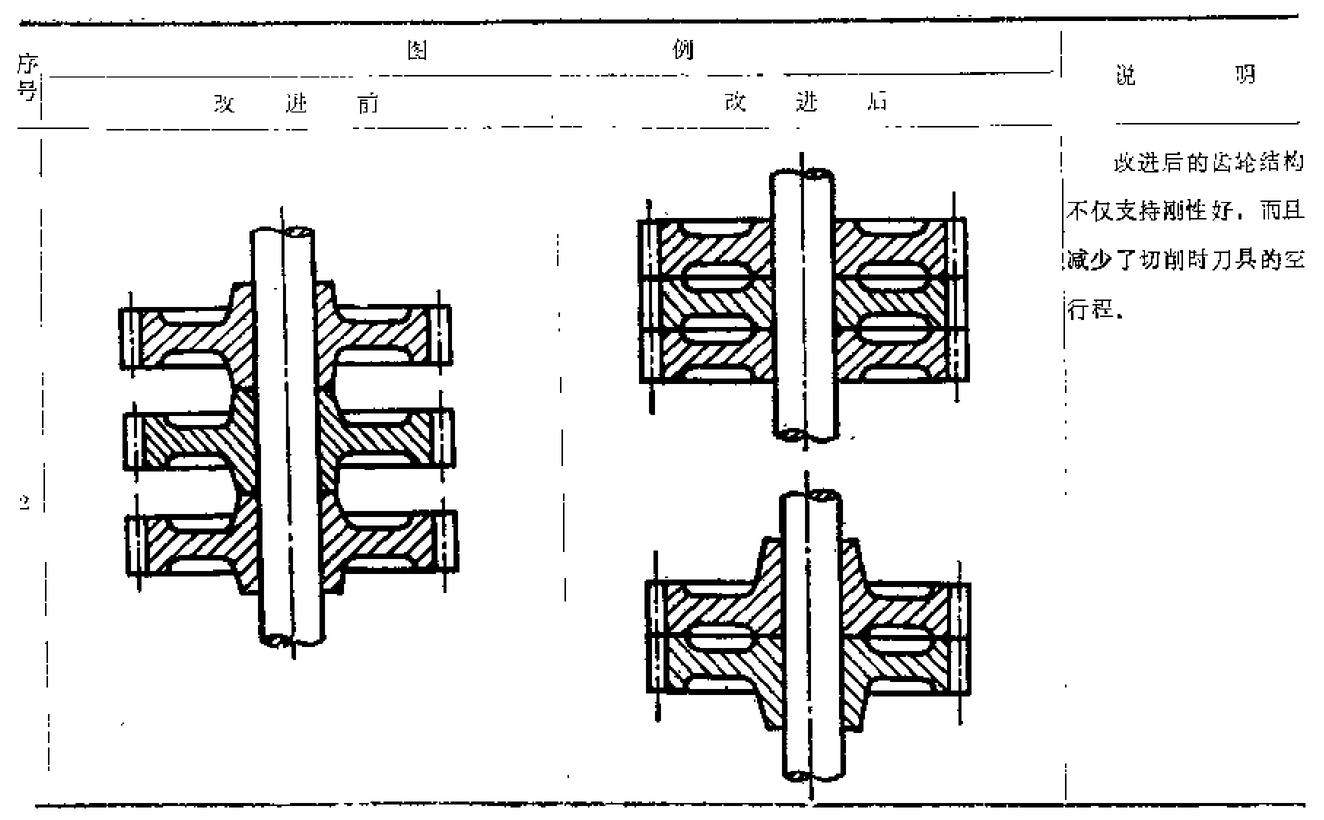
（4）零件的结构应能减少刀具切削时的空行程（见表4-5）

表4-5　减少刀具切削时的空行程



序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
1			改进后的链轮结构由于缩短了空行程y，在相同的有效行程x内，可加工更多的链轮。

续表

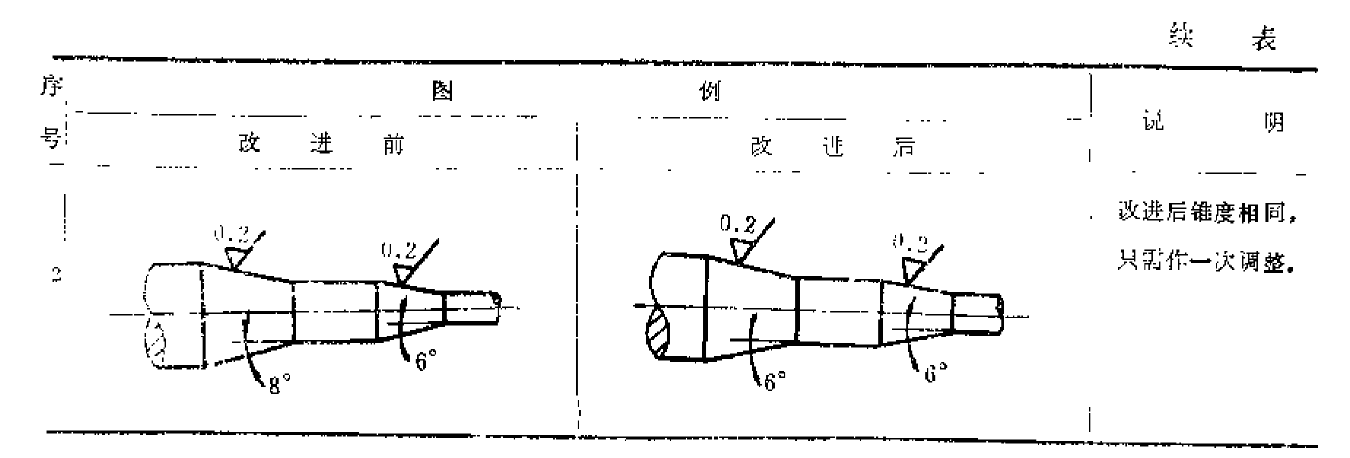
序号	图例		说明
	改进前	改进后	
2			改进后的齿轮结构不仅支持刚性好，而且减少了切削时刀具的空行程。

（5）零件的结构应能减少刀具的调整次数（见表4-6）

表4-6 减少刀具的调整次数

序号	图例		说明
	改进前	改进后	
1			被加工表面应尽量设计在同一平面上，以减少调整，简化加工与检验。

续表



序号	图例（改进前）	图例（改进后）	说明
2	0.2, 0.2, 8°, 6°	0.2, 0.2, 6°, 6°	改进后锥度相同，只需作一次调整。

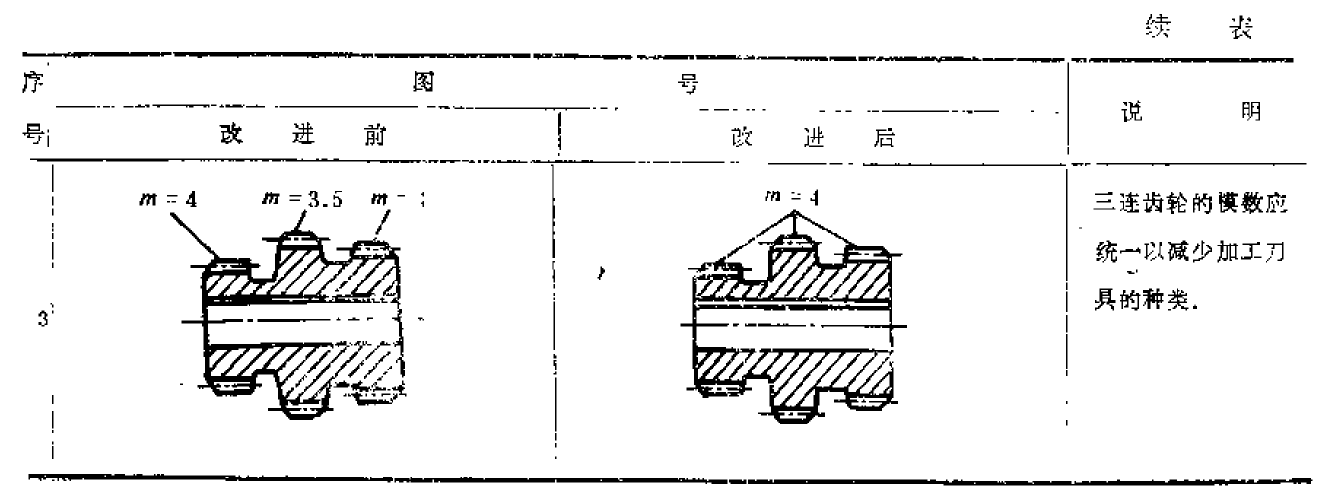
（6）零件的结构应尽可能采用标准刀具加工，同时使用的刀具种类少（见表4-7）



表4-7 采用标准刀具，减少刀具种类

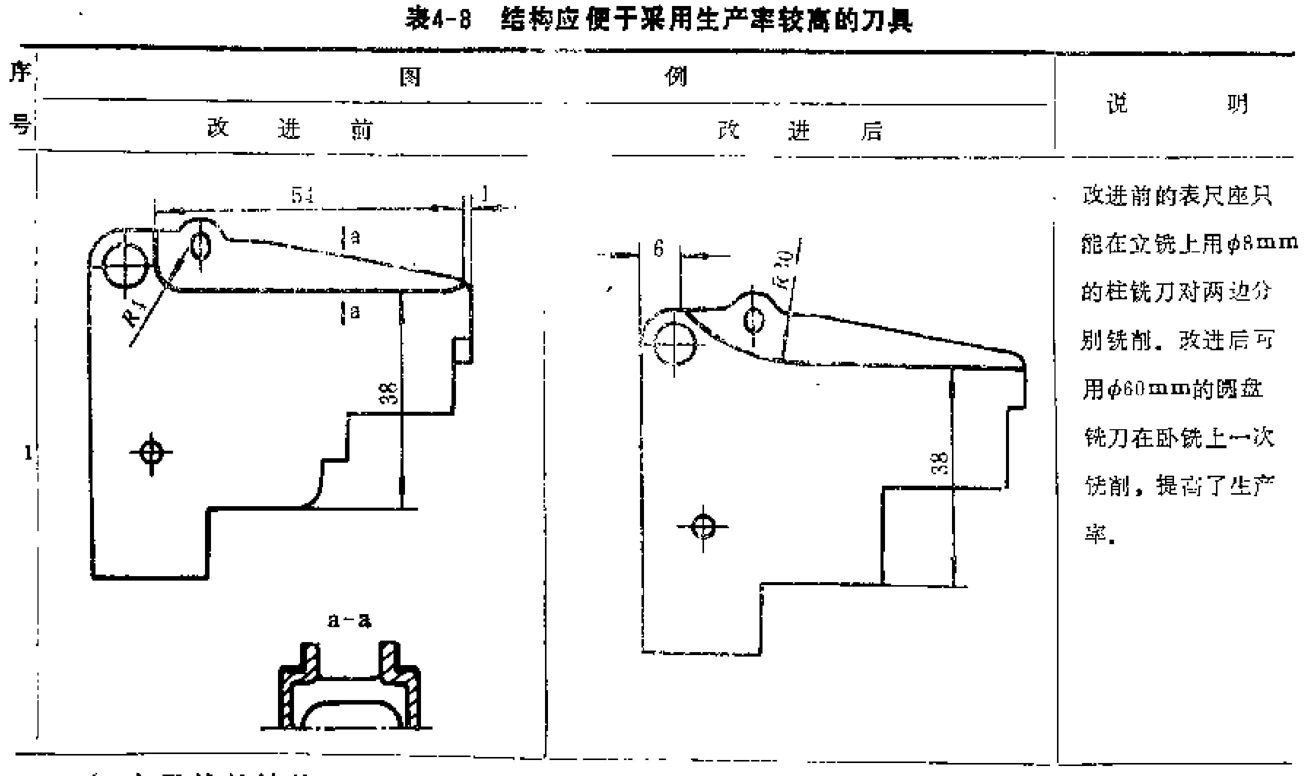
序号	图例（改进前）	图例（改进后）	说明
1	2, 3, 2.5, R3, R5; 2, 2.5, 3; 6, 8	3—3×2, R, R; 2.5, 2.5, 2.5; 6, 6	活塞杆上，轴上的槽或键槽的形状与宽度以及过渡圆弧的半径应尽量一致。
2	3—M8 深12, 4—M10 深18, 4—M12 深32, 3—M6 深12	8—M12 深24, 6—M8 深12	箱体上的螺孔，应尽量一致或减少种类。

续 表

序号	图号 改进前	改进后	说明
3			三连齿轮的模数应统一以减少加工刀具的种类.

（7）零件的结构应便于采用生产率较高的刀具（见表4-8）

表4-8　结构应便于采用生产率较高的刀具

序号	图例 改进前	改进后	说明
1			改进前的表尺座只能在立铣上用ϕ8mm的柱铣刀对两边分别铣削。改进后可用ϕ60mm的圆盘铣刀在卧铣上一次铣削，提高了生产率。

（8）零件的结构应有足够的刚性，以保证加工质量与提高切削效率（见表4-9）

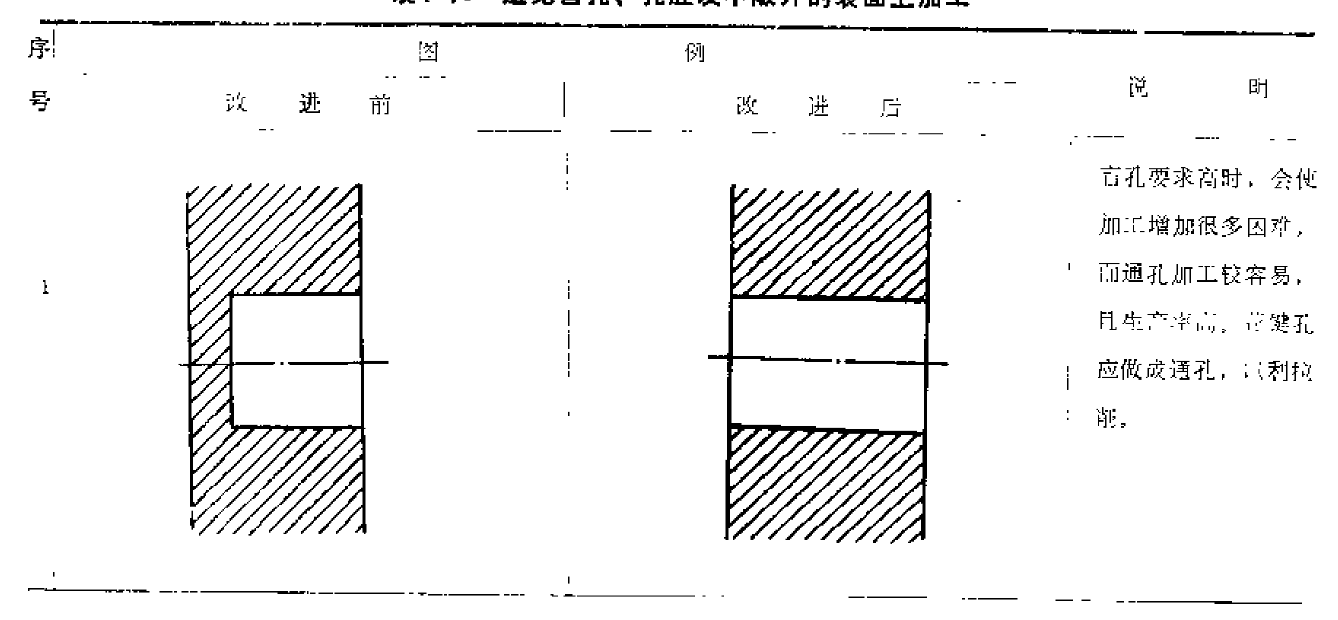
表4-9 结构应有足够的刚性

序号	图例：改进前	图例：改进后	说明
1			改进前为了加工时不发生变形和振动，h必须足够大。改进后增设了加强筋，材料消耗不增加，而平面刚性增大，可用高速切削。
2			横铣高而薄的筋边，刚度不足，发生振动与噪音，生产率低。改进后筋边能沿纵向加工，问题得到解决。

2．零件的结构应便于加工，简化切削

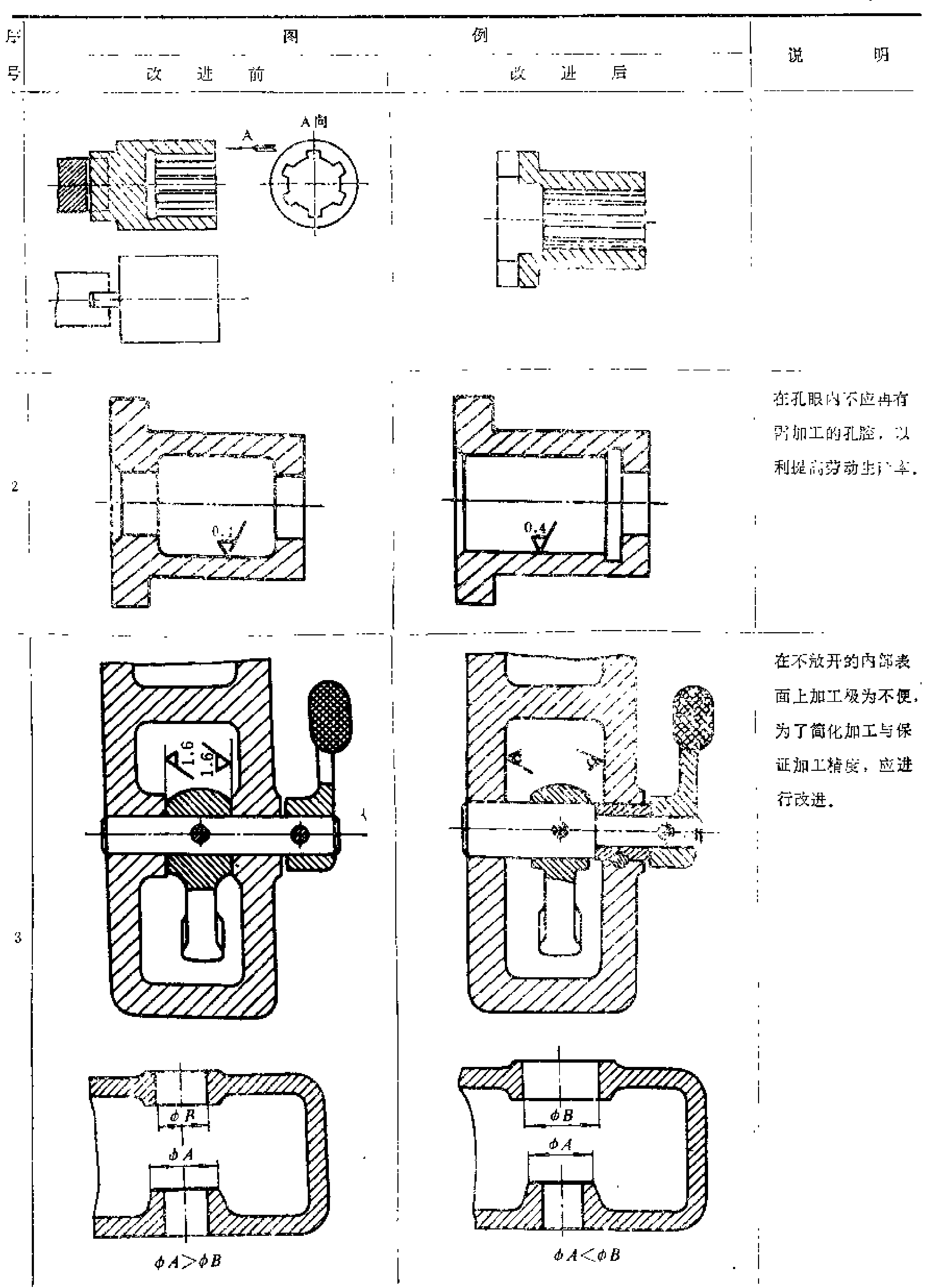
（1）应力求避免盲孔、孔腔及不敞开的内部表面的加工（见表4-10）

表4-10 避免盲孔、孔腔及不敞开的表面上加工



序号	图例：改进前	图例：改进后	说明
1			盲孔要求高时，会使加工增加很多困难，而通孔加工较容易，且生产率高。花键孔应做成通孔，以利拉削。

续 表



序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
2			在孔眼内不应再有需加工的孔腔，以利提高劳动生产率。
3			在不敞开的内部表面上加工极为不便，为了简化加工与保证加工精度，应进行改进。

（2）应保证刀具具有正常的工作条件，能使刀具正常进入和退出（见表4-11）

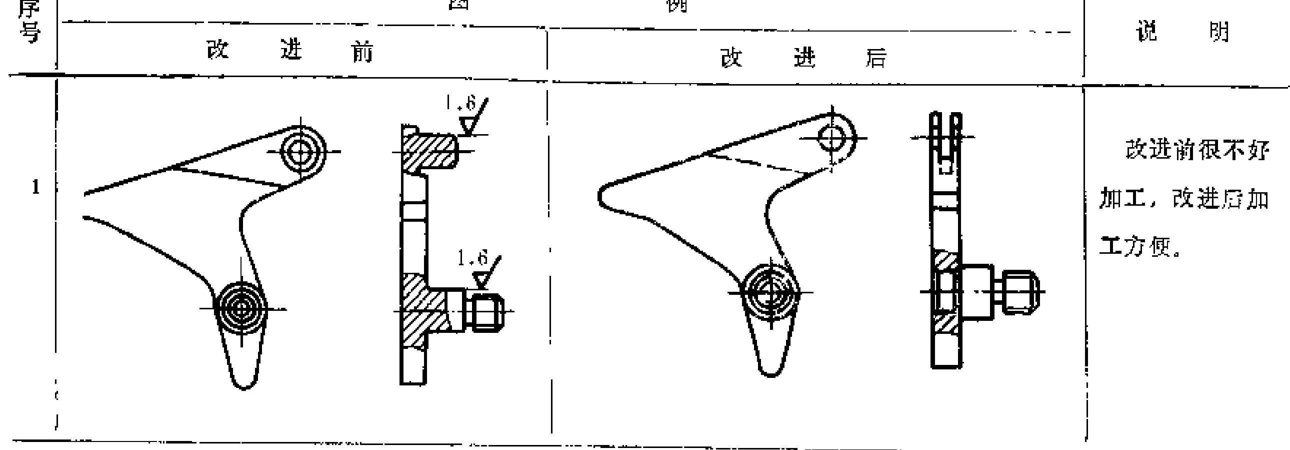
表4-11 应有空刀槽和使刀具正常进入和退出的条件

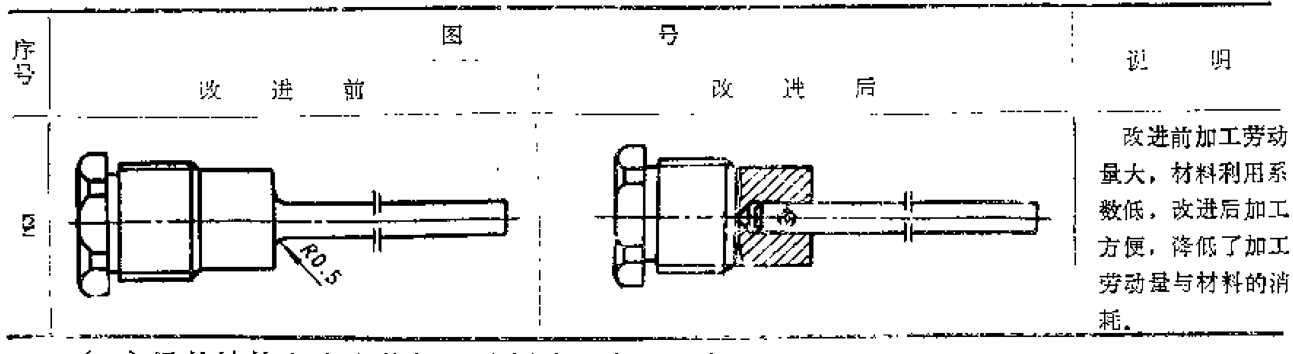
序号	图例		说明
	改进前	改进后	
1			刀具应能自由退刀，以免损坏和过早磨损，同时还可保证与提高加工质量，避免设备事故.

序号	图号		说明
	改进前	改进后	
2			钻孔时，应使工件上的钻进钻出表面垂直于钻头的进给方向，以获得要求的精度与高的生产率。否则会使钻孔复杂，孔的加工精度难于保证，甚至使钻头折断。

（3）采用组合结构，使其加工方便（见表4-12）

表4-12　采用组合结构，使其加工方便

序号	图例		说明
	改进前	改进后	
1			改进前很不好加工，改进后加工方便。



序号	图号 改进前	改进后	说明
12			改进前加工劳动量大，材料利用系数低，改进后加工方便，降低了加工劳动量与材料的消耗。

（4）零件结构本身应使加工简便（见表4-13）

表4-13　零件结构本身应使加工简便

序号	图例 改进前	改进后	说明
1	0.4	0.4	精确的闭孔不便于加工，观察调整困难，而精确的通孔有利于加工与提高生产率。
2	1.6　6.3　1.6	1.6　6.3　1.6	阶梯轴直径不应大小交替，应朝一个方向减小，以简化机床调整，适应模锻与减少加工余量。
3	6.3		机械加工环槽很困难，费时多，应避免。克服办法是开缺口或铸出环槽。
4			在外旋转面上应用两个平面代替六角形和方形，以简化加工。

（5）加工表面与非加工表面应明显分开，不同工序的加工表面应有明确界线，以减少交界处的修整工作（见表4-14）

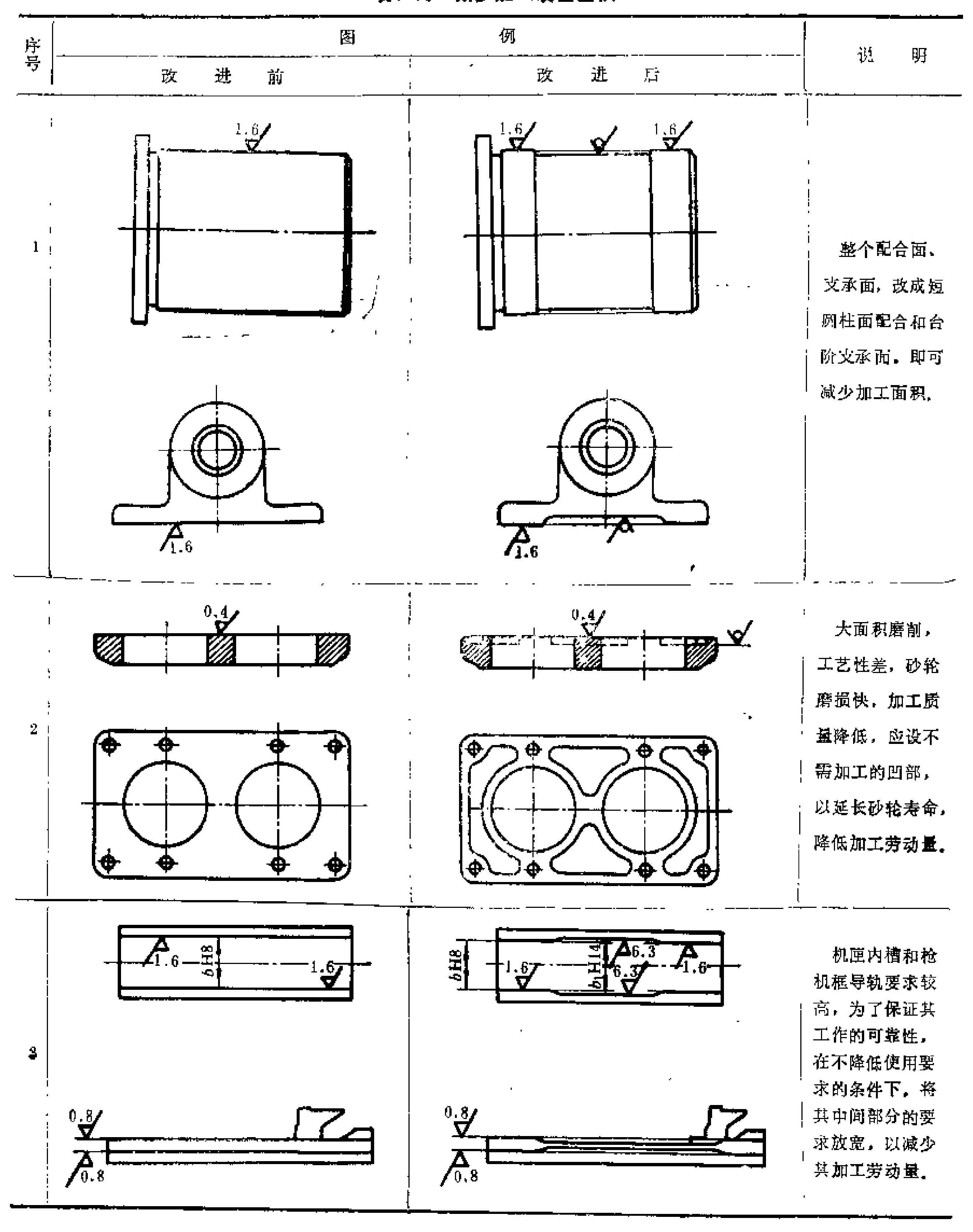
表4-14　加工表面与非加工表面、不同工序的加工表面应明显分开

序号	图例		说　明
	改　进　前	改　进　后	
1	$a<\delta$；1.6	$a(\approx5\text{mm})>\delta$；1.6	加工表面与非加工面分开，且使a=5mm>δ（加工总误差），可减少调整与钳工修锉，可改进工具工作条件与提高加工精度。
2		0.3~0.5mm	不同工序的加工表面应分开，以便进行机床调整和减少钳工修锉。

3．零件的结构应使切削加工量尽量减少

（1）减少加工表面面积（见表4-15）

表4-15 减少加工表面面积



序号	图例：改进前	图例：改进后	说明
1			整个配合面、支承面，改成短圆柱面配合和台阶支承面，即可减少加工面积。
2			大面积磨削，工艺性差，砂轮磨损快，加工质量降低，应设不需加工的凹部，以延长砂轮寿命，降低加工劳动量。
3			机座内槽和枪机框导轨要求较高，为了保证其工作的可靠性，在不降低使用要求的条件下，将其中间部分的要求放宽，以减少其加工劳动量。

（2）采用组合结构减少加工量（见表4-16）

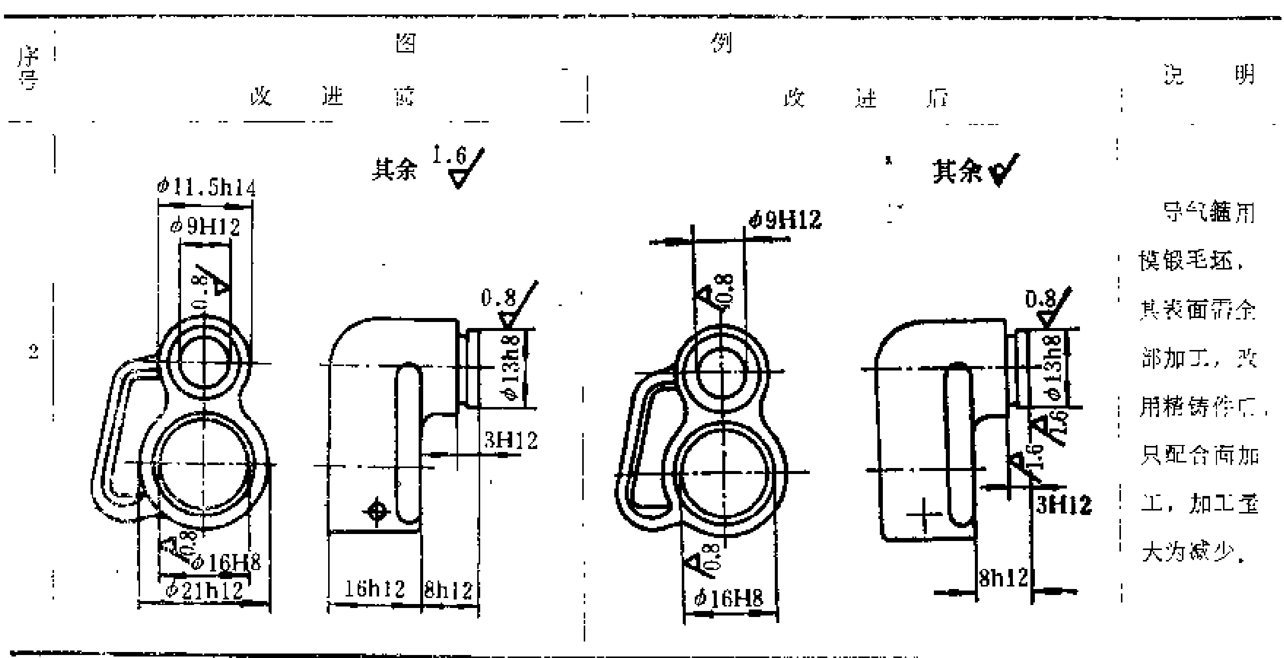
表4-16　采用组合结构减少加工量

序号	图例		说　明
	改　进　前	改　进　后	
1			保险机采用锻件制造，加工很不方便，且加工量很大，采用机加与冲压铆接组合结构，加工方便，加工量大为减小。
2			用锻制毛坯加工出消焰器，加工量很大，改用冲焊结构，加工量大为减小。
3			发射机座原用锻件机加而成，切削量大，后改用机加件与冲压件焊接结合，降低了机加劳动量与刀具的消耗。

（3）采用精铸件减少加工量（见表4-17）

表4-17　采用精铸件减少加工量

序号	图例		说　明
	改　进　前	改　进　后	
1			用精铸手柄代替加工件手柄，无需加工，且外形美观。

序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
2			导气箍用模锻毛坯，其表面需全部加工，改用精铸件后，只配合面加工，加工量大为减少。

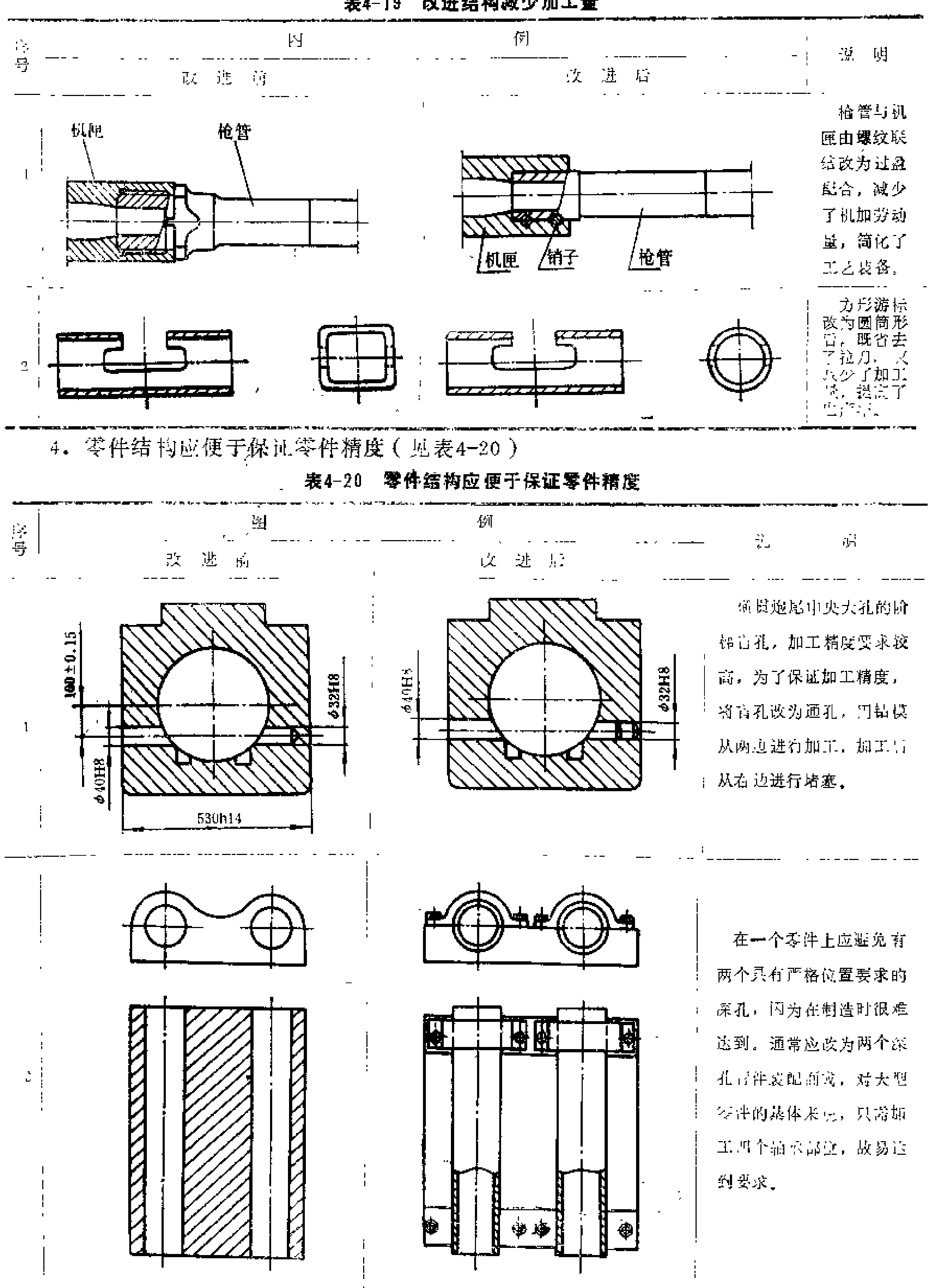
（4）采用型材减少加工量（见表4-18）

表4-18　采用型材减少加工量

序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
1	A　A　A-A	A　A　A-A	空仓挂机零件原用方钢铣削而成，后用异型钢材制造，既省料又减少了刀具消耗和机加劳动量。
2	其余 6.3　3.2　φ12h12	R0.5　φ12h14	导管原用厚壁钢管车制，后将结构略加改变，采用薄壁钢管电热镦，减少了加工量与材料消耗，提高了生产率。

（5）改进结构减少加工量（表4-19）

表4-19 改进结构减少加工量



序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
1			枪管与机匣由螺纹联结改为过盈配合，减少了机加劳动量，简化了工艺装备。
2			方形游标改为圆筒形后，既省去了拉刀，又减少了加工时，提高了生产率。

4．零件结构应便于保证零件精度（见表4-20）

表4-20 零件结构应便于保证零件精度

序号	图例 改进前	图例 改进后	说明
1			横贯炮尾中央大孔的阶梯盲孔，加工精度要求较高，为了保证加工精度，将盲孔改为通孔，用钻模从两边进行加工，加工后从右边进行堵塞。
2			在一个零件上应避免有两个具有严格位置要求的深孔，因为在制造时很难达到。通常应改为两个深孔零件装配而成，对大型零件的基体来说，只需加工四个轴承部位，故易达到要求。

第四节　零部件结构的装配工艺性

装配工艺对产品及其零部件结构的基本要求，有以下五点。

一、产品或部件中所包含的零件数目应尽可能少

减少产品或部件中零件数目的方法，通常可以通过选择最简单、最合理的部件和组合件结构，或将几个零件合并为一个零件来达到。

图4-11所示为一蜗轮轴承座结构，图4-11(a)的结构过于复杂（有滚针轴承、单列向心推力球轴承、双向推力球轴承等），工艺性不好。考虑到蜗轮轴的轴向力不大，无需用那么多轴承，而用一对单列圆锥滚柱轴承即可满足要求，这样，既减少了部件所包含零件的数目，又简化了结构，如图4-11(b)所示。

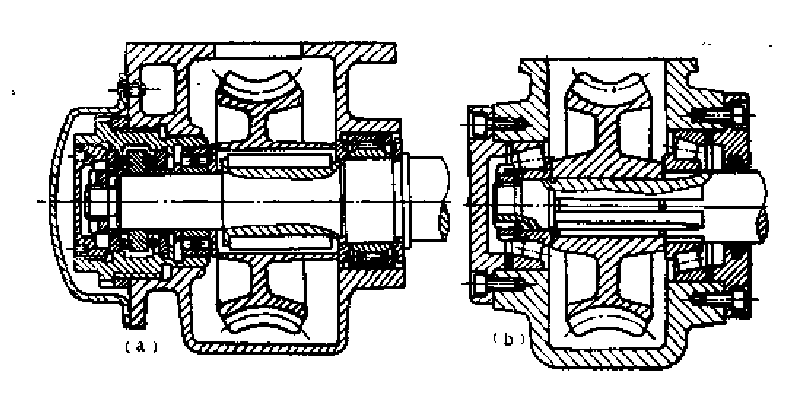


图4-11　蜗轮轴承座装配简图

(a)不好；　　(b)较好

图4-12所示为一蜗杆轴承座，其中图4-12(a)结构较复杂，零件数量多；若蜗杆轴向负荷不很大，图4-12(a)的结构完全可以用图4-12(b)的结构来代替，便可收到图4-11(b)所示的一样效果。

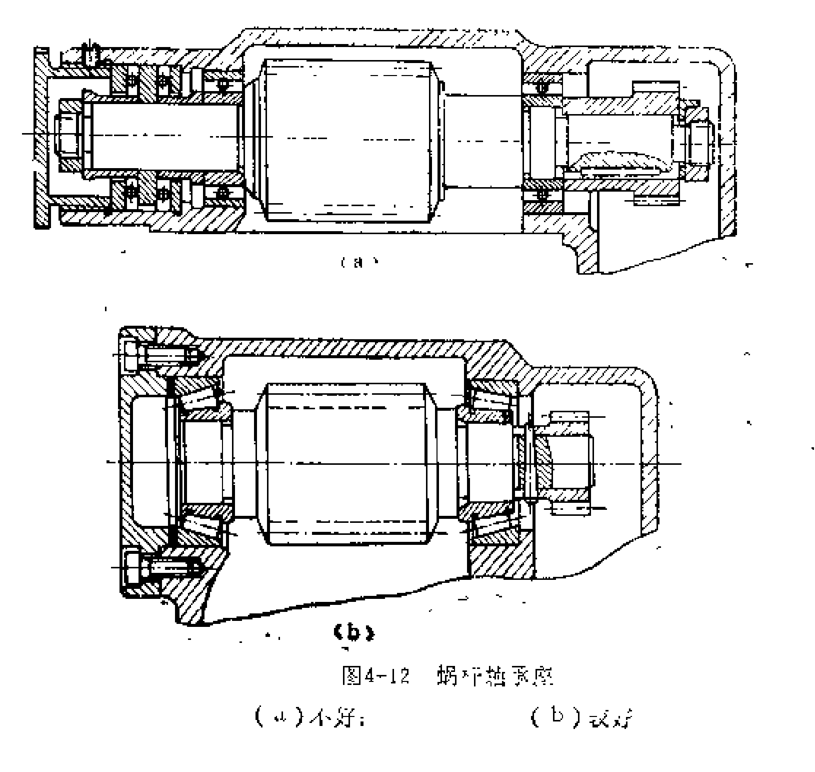


图4-12　蜗杆轴承座

(a)不好；　　(b)较好

二、产品部件应是独立的和能互换的，应能平行地进行装配

设计产品时，必须考虑能把产品分成独立（平行）地进行装配的部件或组合件，并使其装配劳动量相等，这样装配工作能按一定的节奏进行。

设计产品及部件的结构时，应考虑使其在安装和调整工作中，无需进行局部拆卸。

设计产品时，把产品分成一些独立的部件，对于装配工作来说有下列优点：

1．便于平行地进行装配工作，从而使装配周期缩短；

2．可以改善装配工作条件，因为各个部件装配的工作地点可以专门化，而且可以设计装配用的专用工艺装置，提高装配效率；

3．有可能使用技术水平较低的工人，使装配费用降低；

4．能够较好地组织装配工作，使装配劳动量降低；

5．有利于组织"封闭式"生产（一个车间生产一个部件），保证产品质量；

6．有利于企业协作、配套，以提高劳动生产率和降低成本。

图4-13所示为机床上的齿轮传动系统，在图4-13(a)中，齿轮均是一个个地装在机床壁板轴上的，不仅孔的加工不方便，轴和齿轮的装配也很不方便；在图4-13(b)中，则把传动齿轮组成单独的齿轮箱，这样，装配方便，能提高工效，又便于维修。

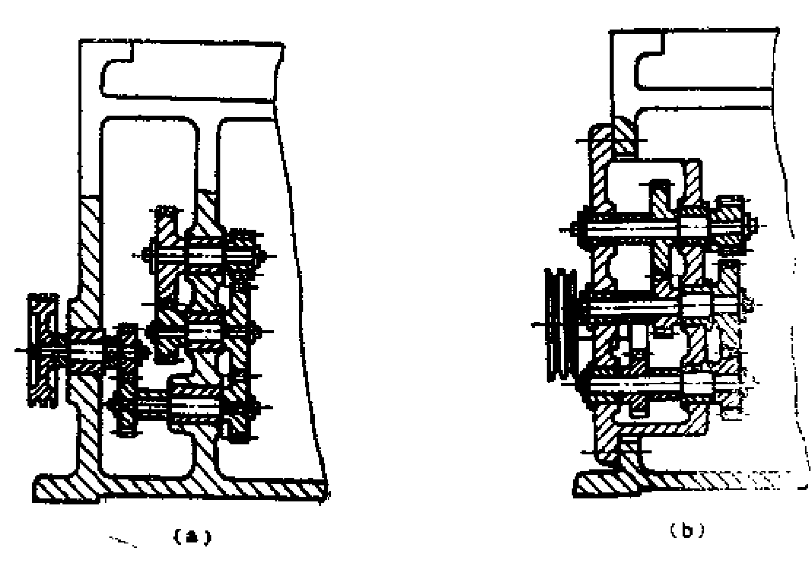


图4-13 齿轮传动系统的装配图

(a)非独立装配单元；　(b)独立装配单元

图4-14所示为六角车床上与快速行程轴相联的有关部分。图4-14(a)为原先采用的结构，快速行程轴的一端装在箱体1内，轴上装有一对圆锥滚柱轴承及一个齿轮，另一端装在拖板上的操纵箱2内，这种结构工艺性不好，装配起来很不方便。因此将结构改为图4-14(b)，把快速行程轴分为两个零件，一个为较长而带有螺纹的光轴3，另一个为较短的阶梯轴4，中间用联轴节5联接。这样箱体1便成为独立的装配单元，可以单独地进行装配，比较方便，并可与其它装配单元平行装配，缩短装配周期。此外，机械加工也较以前方便（原来的轴太长，不便于加工）。

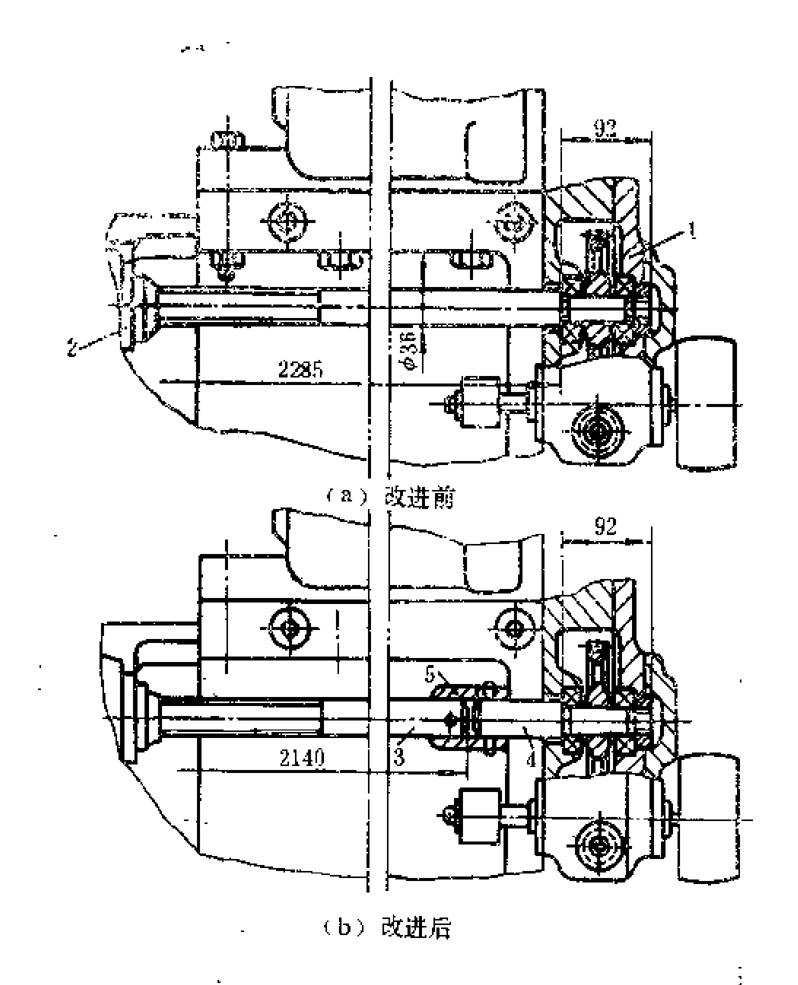


图4-14　六角车床上两种结构的比较

三、零部件的结构应便于装配，易于拆卸

在设计零部件或组合件时，须注意便于装配、调整、检验和使用中的维修，同时还应注意尽量减轻装配工作中各部分操作。

为了便于装配，要求做到：

1．在设计互相配合的零件时，须在零件上规定倒角。通常配合双方均应制有倒角为好，图4-15(a)、(b)为一方倒角。对于有过盈配合的零件，在孔的导入部分也应制出倒角如图4-15(c)。螺纹连接双方都要有倒角，除能改善切削螺纹的条件外，还可保护螺纹，使其不致碰伤，也使螺纹装配方便如图4-15(d)所示。

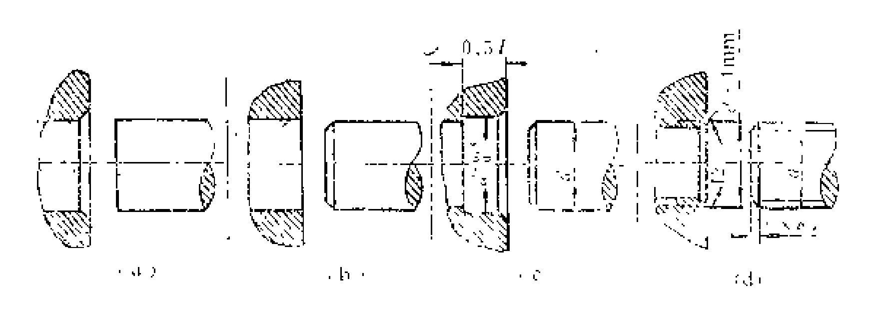
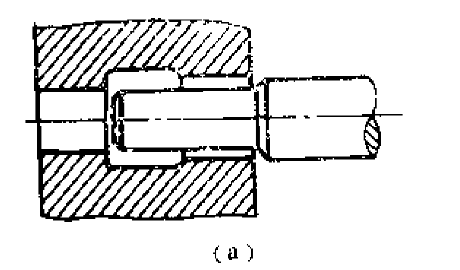
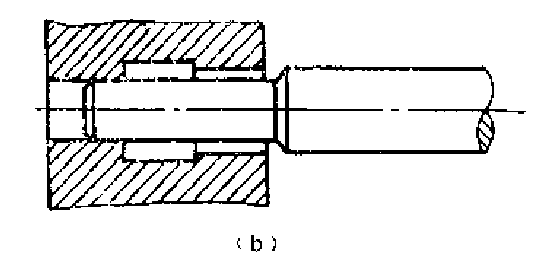


图4-15　相配零件上的倒角

（a）、（b）一方倒角；　（c）、（d）双方倒角；

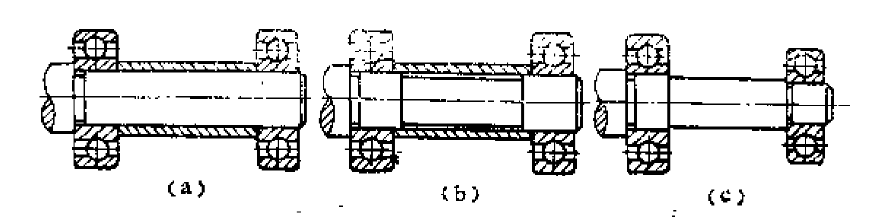
2．设计的配合件如果配合表面较多时，应使配合表面依次接触，而不应同时接触。图4-16(a)所示的装配为同时接触，很难装配，图4-16(b)所示的装配为依次接触，便于装配。

(a)　　　　　　　　　　(b)

图4-16　有两个表面相配合的情况
(a)不好；(b)较好

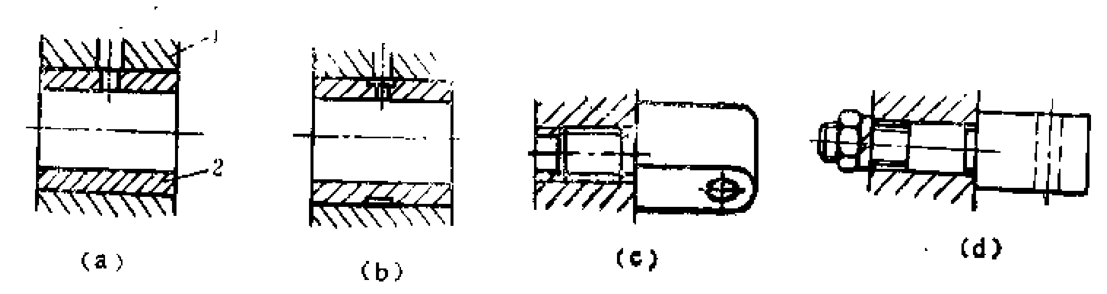
3．设计配合件时，应使过盈配合部分在装配时移动(滑动)距离最小。这不仅可减少装配时的劳动，而且还可防止损坏零件表面质量。图4-17(a)所示的结构，在装左边轴承时，必须将轴承在整个轴的表面上滑过，而轴承和轴的配合较紧，故装配很不方便；如若改为图4-17(b)所示的结构，在装配左边那个轴承时虽不必在轴的全长上滑过，但因两个轴承的大小相同，轴上两个配合表面的直径也相同，故仍然有所不便。从装配观点出发，若改为图4-17(c)所示的结构，则最为方便。



(a)　　　　(b)　　　　(c)

图4-17　轴承与轴的装配
(a)不好；(b)较好；(c)好

4．设计要求对中或有一定方向的配合件时，应在装配时能方便地找正和定位。在图4-18中，图4-18(a)所示的结构，装配时轴承2上的油孔与轴承座1上的油孔不易对中，若改为图4-18(b)所示的结构，即在轴承上作出环形槽，这样装配时就很方便。图4-18(c)所示结构，一零件上有一孔具有方向性，在装配时很难保证其方向，若改为图4-18(d)所示结构，孔的位置可以调整，装配则比较方便。



(a)　　　(b)　　　(c)　　　(d)

图4-18　要求对中或具有一定方向的配合件的两种结构
(a)不好；(b)较好；(c)不好；(d)好
1—轴承座；2—轴承

5．设计过盈(静)配合或螺栓联接的部件时，应便于装拆

图4-19所示为一些过盈配合件。图4-19(a)所示结构在装配后不好拆卸，图4-19(b)为经过改进，设有拆卸螺孔，故易于拆卸；图4-19(c)为套筒(机体)孔台肩处的直径小于或

等于轴承外环内径，轴承不易拆卸，图4-19(d)为经过改进后的结构，使套筒孔台肩处的直径大于轴承外环的内径，使轴承易于拆卸；图4-19(c)为在闭孔中压装销子的情况，由于没有排气孔，装配不方便，不能保证装配要求，且拆卸不便。图4-19(f)是经过改进后的结构。

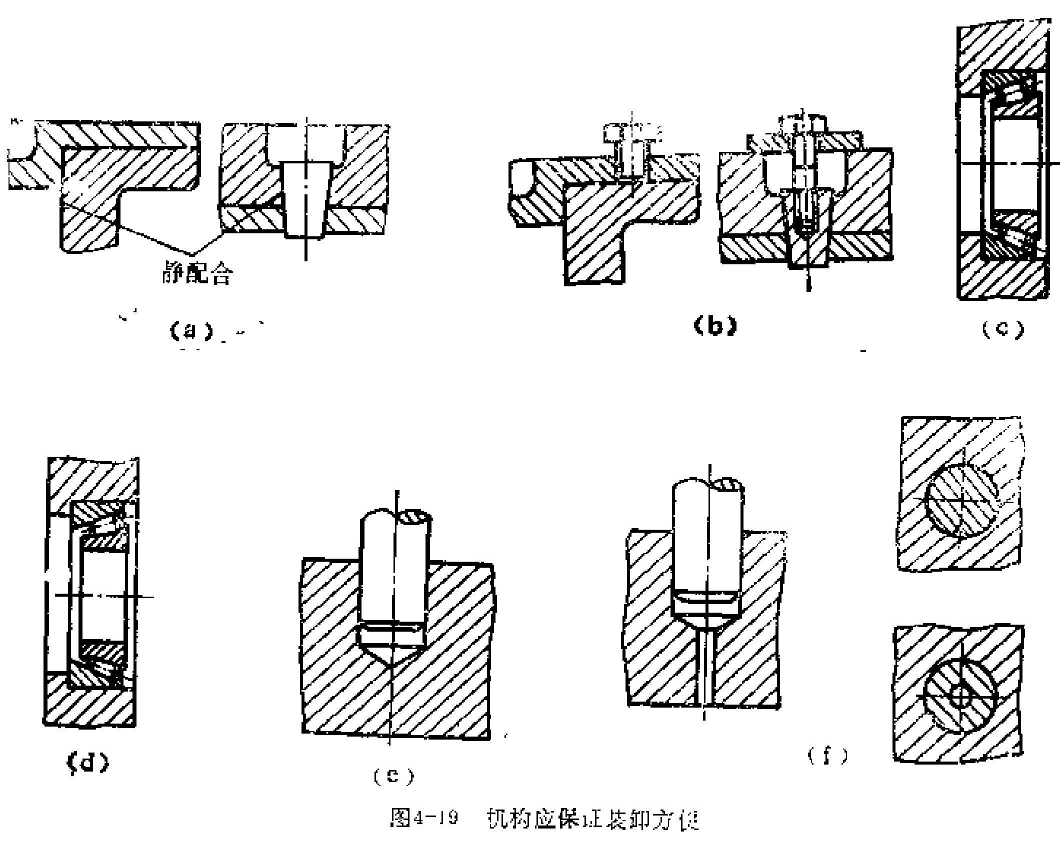


图4-19 机构应保证装卸方便
(a)不便拆卸；(b)便于拆卸；(c)不便拆卸；
(d)便于拆卸；(e)不易装配；(f)易于装配

图4-20所示为螺栓联接结构，图4-20(a)的设计装配困难；图4-20(b)为改进后的结构，在侧壁上开了工艺孔，装配情况有所改善；图4-20(c)为改进得好的一种结构。图4-21所示亦为螺栓联接的结构，图4-21(a)的结构在拧紧螺母时螺栓可能转动而拧不紧，图4-21(b)为改进后的结构，在拧紧螺母时螺栓不会转动。

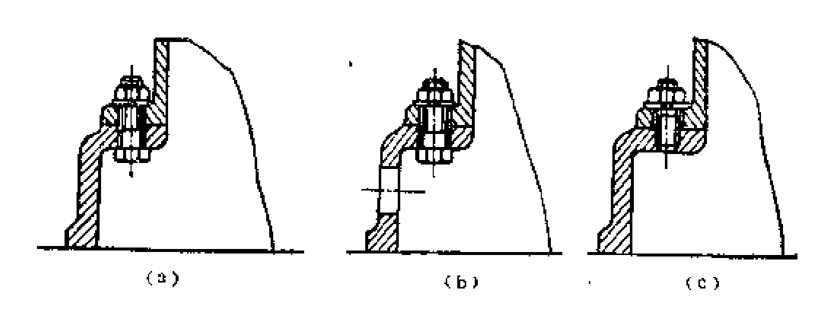


图4-20 螺栓联接结构
(a)不好；(b)较好；(c)好

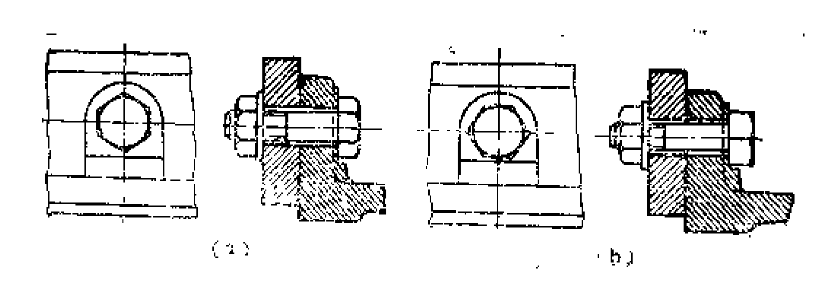


图4-21　螺栓联接结构

(a)不好；(b)较好

四、装配时不需机械加工或很少进行机械加工

在装配工艺过程中插入机械加工，使装配车间需要添加机械加工设备，这些设备既占面积，又易引起装配工作的杂乱，降低了装配生产率，延长了装配周期，同时也破坏了装配流水作业的原则。此外，加工后残留在产品中的切屑若清除不净，不但很脏，还会加速零件的磨损，降低产品的寿命。所以应该尽量避免装配时的机械加工。特别是在大批和大量生产中，装配工作最好只包括一些零件和部件间的联接和安装的工作。

五、保证零件和部件在装配时的互换性

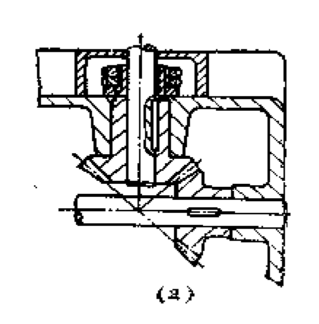
从装配工艺性的观点出发，在大批、大量生产中，零件和部件应具有高度的互换性，因为它可以保证零件和部件在装配过程中不需经过选择、修锉和调整即能进行装配。

为了保证互换性，设计时应满足以下三项要求：

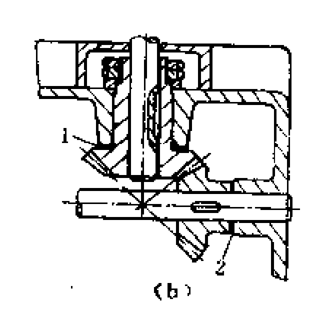
1．零件形状应便于制造，且具有足够的制造精度，以满足装配尺寸链的要求

只有具有足够精度的零件，在采用完全互换法装配时才能互换，而不需要选配、修锉和调整。但是，若部件或产品的装配精度要求很高，或参与装配尺寸链的环较多，这时如要使各零件能达到完全互换，则会使零件的制造精度很高，使加工成本增加，为了解决这个问题，通常可将零件的制造公差放大，使其按经济精度制造，然后采用其它装配方法(如不完全互换法、选配法、修配法和调整法)来保证装配精度。须知，按完全互换法所确定的零件制造公差要比其它装配方法所确定的公差要严2～3倍。

图4-22所示为锥形齿轮啮合，要求装配后两轮的轴向位置正确，使节锥顶点重合。图4-22(a)结构装配时需刮削(或切削)箱体或齿轮支承端面，并需多次装拆齿轮以调整啮合精度；若齿轮或箱体支承端面因相对运动而磨损时，修复较困难。图4-22(b)所示结构采用了调整环节(调整垫1和2)，装配时易于保证装配要求，同时也减化了装配工作。



(a)



(b)

图4-22　锥形齿轮啮合的装配

(a)不好；(b)较好

图4-23所示为丝杠3、丝杠螺母1和丝杠支承2的装配，要求丝杠支承2与丝杠螺母1同轴，

图4-23(a)结构不易保证同轴度（需要修锉或选配），图4-23(b)结构采用了调整垫片4，易于保证同轴度。

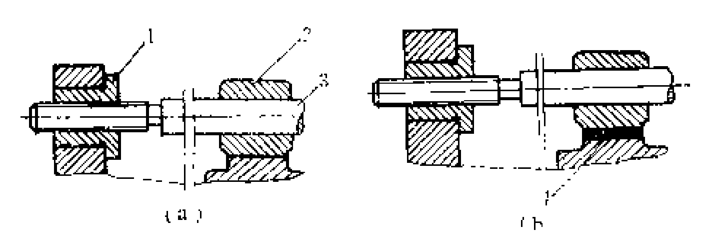


图4-23　丝杠、丝杠螺母和丝杠支承的装配

(a)不好；(b)较好

1—丝杠螺母；2—丝杠支承；3—丝杠；4—调整垫片

2．零部件结构上应有合适的装配基面，以保证零部件所需的位置

零、部件在装配时，必须首先找正到正确位置，才能进行紧固。如结构中考虑并设置了装配基面，则装配时的正确位置容易保证，否则将使装配工作产生较大的困难，且不易达到装配技术要求。

图4-24所示为有同轴度要求的两种装配。图4-24(a)的结构不易保证两孔的同轴度，图4-24(b)设置了装配基面，同轴度容易保证；图4-24(c)采用了螺纹定位，由于螺纹之间有间隙，不能保证汽缸盖内孔与缸体内孔的同轴度，致使装配活塞时产生困难，即使能装上，也易出现活塞运动不灵活的现象。若改为圆柱面配合，由于有了装配基面，上述要求容易达到，还可避免活塞运动不灵活的现象，如图4-24(d)所示。

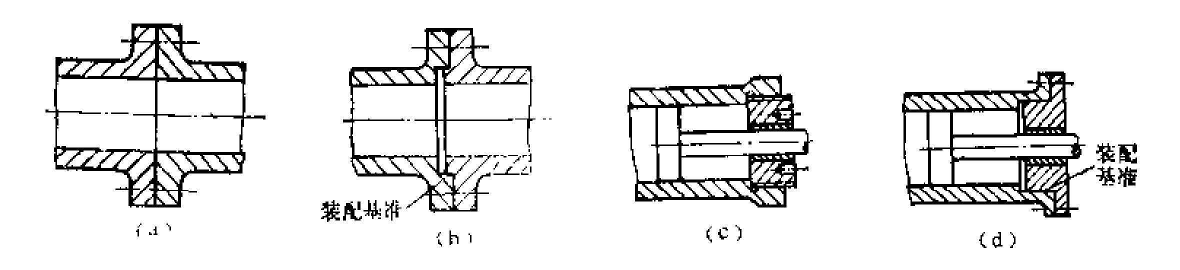
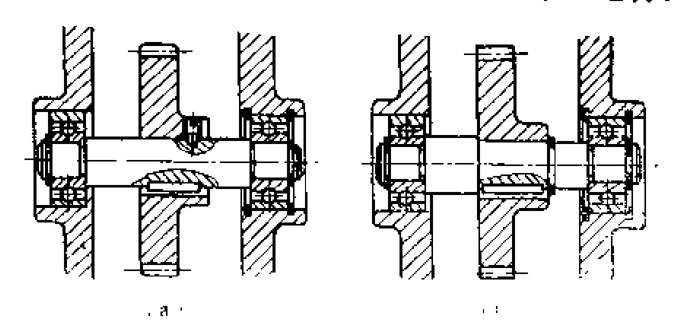


图4-24　有同轴度要求的有无装配基准面的两种装配

(a)无装配基面；(b)有装配基面；(c)无装配基面；(d)有装配基面

图4-25所示结构，其中图4-25(a)为安装齿轮时没有装配基面，故在装配时要钻孔攻丝，用螺钉固定位置；而图4-25(b)有装配基面，装配时便不必进行机械加工。


图4-25　有无装配基面的齿轮装配

(a)无装配基面；(b)有装配基面

3．零部件的结构在装配时不进行钳工加工

用钳工加工进行修配，既费工又费时，应尽量避免。如图4-26所示，其中图4-26(a)、(c)配合面过多，要同时接触，不仅零件的尺寸公差要求严格，不易制造，而且必然要增加装配时的钳工修配工作量，若改为图4-26(b)、(d)所示的配合，在装配时即可免去钳工修配。

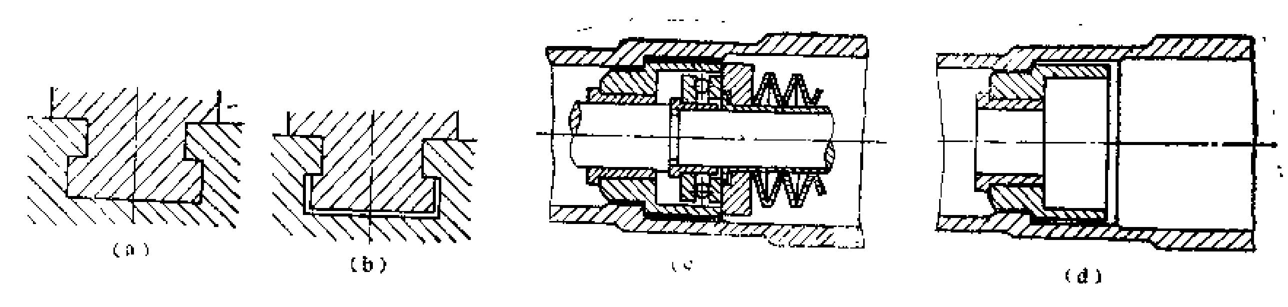


图4-26 需要或免去钳工修配的两种结构
(a)、(c)不好；(b)、(d)较好

上面比较详细地叙述了切削加工零件的结构工艺性和零部件结构的装配工艺性，除此以外铸造、锻造、冲压、焊接和热处理等等，各种工艺均有其工艺性要求。

零件结构的铸造工艺性，包括：铸件制造（木模、造型、制芯等）的方便性；能有效地防止铸造缺陷（应力集中、裂纹、缩孔、疏松、气孔、粘砂、变形等）的产生；具有合理的结构要素（壁厚、壁的连接与过渡、铸造斜度等）等。

零件结构的锻造工艺性：对自由锻造，应避免锻造锥度、斜面、加固筋、工字形截面以及各种复杂形状；对模型锻造，应正确而合理地确定分模面（便于锻件取出、便于发现上、下模错位、易于充满模腔、易于制造模具与切边），截面几何形状应适于模锻工艺（形状对称分模面、锻件长度方向上各部分的横截面积之差应小），合理地规定模锻件中的一般结构要素（锻模斜度、圆角半径），锻件的形状要考虑到机械加工时的装夹和加工方便，保证零件主要受力方向所要求的金属流线方向，等等。

零件结构的冲压工艺性，可参阅《冷冲压工艺》一书。

焊接构件的结构工艺性，主要表现在材料的可焊性，焊接焊头的强度以及能减少与限制焊接后的变形等等。

零件结构的热处理工艺性，主要表现在能防止在热处理过程中发生裂纹、变形、硬度不匀等等疵病的产生。为此要求零件应避免厚薄悬殊、锐角锐棱、盲孔死角，采用封闭、对称、组合结构等等。

以上提出了各工种工艺性的要求，有时它们之间是互相矛盾的，例如有时便于铸造却不便于加工，便于加工却不便于装配。因此要求设计者具有必要的生产知识并结合生产实际情况全面地考虑与解决这些问题。

第五节　结构工艺性的评定

前面几节已经讨论了产品和零部件的结构工艺性，从中可知，结构工艺性对产品的制造质量、劳动消耗、生产成本、制造周期和贵重设备的需要量等均有直接的关系。因此在设计产品时，除了满足使用要求外，还应使结构合乎各种工艺要求，这方面考虑得愈充分愈仔

细，产品的质量就愈高，生产周期就愈短，劳动消耗量和成本就愈低，使生产能够更好地体现出优质、高产、低消耗的要求。

对产品设计结构工艺性的评定，目前还没有一个公认的标准。通常可从以下几个方面来进行衡量：

1．产品的总劳动量；

2．产品成本；

3．生产周期；

4．贵重设备需要量；

5．材料的利用率；

6．标准化（规格化）程度；

7．标准零件重复率；

8．结构的继承性程度等。

表4-21为一般机械制造中工艺性指标，可供评定时参考。

表4-21　工艺性评定参考指标

序　号	指　标　内　容	比　值　关　系	一　般　指　标
1	继　承　件	$\frac{\text{已掌握的零件种数}}{\text{产品全部零件的种数}}$	0.4～0.75（发动机制造业）
2	标准化程度	$\frac{\text{标准与规格零件种数}}{\text{产品全部零件的种数}}$	0.27～0.35
3	修配劳动率	$\frac{\text{修配工作劳动量}}{\text{装配劳动量}}$	0.1～0.15
4	装配劳动率	$\frac{\text{装配劳动量}}{\text{机械加工劳动量}}$	0.5～1（重型机器制造业）
5	材料利用率	$\frac{\text{零件的净重}}{\text{材料消耗定额}}$	0.45～0.7

第五章　机械加工工艺规程的制订

第一节　概　　述

工艺规程是将产品或零件的工艺过程按一定的格式用图表或文字的形式固定下来，用以指导生产的技术文件。由于有不同种类的工艺过程，所以便有不同种类的工艺规程。工艺规程是工厂组织生产、指导生产最基本的技术文件，对工厂指导生产，保证产品质量、提高劳动生产率、降低生产成本、改善劳动条件具有重要的意义。

一、工艺规程的作用

工艺规程的作用，归纳起来有下述四个方面：

1．工艺规程是指导生产的主要技术文件

工艺规程是在给定的生产条件下，在总结生产实践经验和运用工艺理论进行科学分析的基础上，由多个加工工艺方案选优而制订的。它规定了工件加工的工艺路线及经过的车间和工段，各工序的具体加工内容和质量要求，切削用量，工时定额以及采用的机床和工艺装备等一切必须的加工工艺资料，故它是指导生产的主要技术文件。工艺规程是工艺上的立法，实际生产必须按照工艺规程的规定进行，不得违反，这就是通常所说的工艺纪律。只有遵守工艺规程，才能实现优质、高效、低成本和安全生产。否则便会产生不良后果，甚至使生产陷入混乱状态。

工艺规程具有两重性：相对稳定性和可变性。前者指的是在一定时期内它是固定不变的，只有按工艺规程生产才能确保产品质量和提高经济效益；后者则是由于生产的不断发展，先进工艺的不断涌现，技术的不断进步，需要定期地吸收新的东西，改进与完善现行的工艺规程。只有两者结合起来，才能使工艺规程对生产起到更好的指导作用。

2．工艺规程是组织生产、安排管理生产的重要依据

在新产品投产前，需要按照工艺规程进行大量的生产准备、技术准备和计划调度工作。例如刀、夹、量具的设计、制造或采购，原材料、毛坯件的制造或采购，必要的设备改装或添置，机床负荷的调整，劳动力的组织，作业计划的编排，工时定额的制定，成本的核算等，都是以工艺规程为依据来进行组织和安排的。

3．工艺规程是新建、扩建工厂或车间的基本资料

在新建、扩建工厂或车间时，只有根据工艺规程和生产纲领才能正确地确定出生产所需的机床和其它设备的种类、规格和数量，车间和工厂的面积，机床的布置，生产工人的工种、等级及数量以及各辅助部门的安排等。

4．工艺规程有助于技术交流和推广先进经验

由于国家、国防和社会对某些产品的需求量较大，个别工厂的生产量不能满足需要，需多处建厂进行生产时，主制厂与复制厂之间便可通过工艺规程作为技术桥梁，由主制厂向复

制厂推广。这样，复制厂既可大大地缩短试制生产周期，又可较快地提高工艺水平，收到良好的经济效益。

此外，在对外贸易中，某些工艺规程还可作为技术专利，取得外汇。

工艺规程与工艺装备图纸等一起合称为工艺文件。在产品正式投入生产之前，必须编制出全部的工艺文件。基本的工艺文件是工艺卡片。工艺卡片的种类很多，它们的格式和内容随工艺的种类、生产的类型及各厂的惯用格式而变化。常用的有以下几种：

1． 工艺过程卡（简称过程卡或路线单） 它是以工序为单位简要表明一个零件全部加工过程的卡片。包括零件各个工序的名称，经过的车间、工段，所用的机床、刀具、夹具、量具等。它是制订其它工艺文件的基础，也是生产技术准备、编制作业计划和组织生产的依据。这种卡片，由于各工序的说明不够具体，故一般不能直接指导工人操作，而多为生产管理方面使用。在单件小批生产中，通常不再编制其它较详细的工艺文件，就以这种卡片指导生产。

2． 工艺卡片 它是以工序为单位详细说明零件加工工艺过程的工艺文件，是指导工人生产、帮助车间干部和技术人员掌握整个零件加工过程的一种主要技术文件。其内容包括零件的工艺特性（材料、质量、加工表面及其加工精度和表面粗糙度等）、毛坯性质、各道工序的具体内容及加工要求等。这种卡片广泛用于成批生产和小批生产中的重要零件。

3． 工序卡片 它是根据工艺卡片为每一道工序制订的，主要用来具体指导操作工人进行生产的一种工艺文件。在卡片上附有工序简图，并详细记载了该工序加工所需要的资料，如定位基准选择、工件安装方法、工序尺寸及公差、工步内容、所用机床、刀具、量具、切削用量的选择和工时定额的规定等。这种卡片多用于大批大量生产或成批生产中比较重要的零件。

4． 调整卡片 在自动机床、多刀半自动机床、组合机床等机床上加工时，不编制工序卡片，而是编制调整卡片。因为在这些机床上加工时，加工质量主要取决于机床的调整是否正确。调整卡片的内容包括调整机床时所需要的全部资料，如机床挂轮、刀具、夹具、辅助工具、凸轮及其安装调整位置，工件加工要求和工时定额等。不同类型的机床，其卡片格式也不相同。由于调整工作比较复杂，所以调整卡片是指导调整工人工作的主要文件，也是操作工人使用的主要文件。

5． 检验卡片 它是为了保证产品质量而进行技术检验用的卡片，是检验人员使用的主要文件。卡片规定了检验对象、检验的项目、允许的偏差、检验的方法和使用的工具等，并附有零件检验简图。这种卡片在大批大量生产中普遍使用，而在中小批生产中，只有少数重要工序才使用。

除上述这些工艺文件外，对于数控机床要编制程序，这也是一种工艺文件。

二、制订工艺规程的原则

制订工艺规程的原则是：在一定的生产条件（产量、设备、技术水平、……）下，以最少的劳动消耗和最低的费用，按计划规定的速度，可靠地加工出符合图纸及技术要求的零件。简言之，优质、高产、低耗就是制订工艺规程的原则。

在制订工艺规程时，还应注意以下几点：

1． 技术上的先进性 在制订工艺规程时，要了解国内外本行业工艺技术的发展，通过必要的工艺试验，积极采纳适用的先进工艺和工艺装备。

2． 经济上的合理性 在一定生产条件下，通常会有多个能保证工件技术要求的工艺方案。必须通过工艺方案的比较分析，选取最优方案，既体现充分挖掘企业潜力，又使产品的能源、物资消耗和成本最低。

3． 有良好的劳动条件 其内容包括减轻工人的劳动强度、保证生产安全、消除或减少环境污染等。因此，在制订工艺规程时，要注意从工艺方案上采取机械化或自动化措施，将工人从某些笨重繁杂的体力劳动中解放出来。

三、制订工艺规程时所需的原始资料

制订工艺规程时，通常应具备下列原始资料：

1． 产品装配图和零件工作图 设计装配工艺规程时需要整套装配图；设计零件加工工艺规程时，需要零件工作图和零件所属部件的装配图。

2． 产品验收技术条件或质量标准 设计装配工艺规程时必须有产品验收技术条件；设计零件加工工艺规程时，对个别有特殊要求的零件，也需要有验收技术条件。

3． 产品的生产纲领

4． 毛坯资料 包括毛坯车间的生产能力和技术水平，各种钢材型料的品种规格，毛坯的供应条件等。小批生产时，一般不绘毛坯图，只说明毛坯的种类和各待加工表面余量的大小。大批大量生产时，必须有毛坯图，根据毛坯图掌握毛坯的结构特征（如分型面、浇口、冒口的位置、拔模斜度等），以便正确地选择基准和设计夹具。同时根据毛坯尺寸的大小确定各加工表面的加工余量。

5． 本厂现有的生产条件 为了使制订的工艺规程切实可行，一定要考虑本厂的实际生产条件，因此要深入生产实际，了解毛坯的生产能力与技术水平；加工设备和工艺装备的规格及性能；工人的技术水平以及专用设备和工艺装备的制造能力等。

6． 国内外工艺技术的发展情况 制订的工艺规程既要符合生产实际，又不能墨守成规，要随着产品和生产的发展，采用新技术、新工艺，这就需要经常研究国内外有关工艺技术资料，推广先进经验，采用先进技术，不断提高工艺水平。

7． 有关标准、目录、手册、图册和资料 包括国家、主管部的各种标准及企业标准。同类产品、同类零件经过生产考验的工艺规程，设备、工具、原材料目录，工艺手册，刀、夹、量具图册，切削用量手册，有关时间定额及成本核算资料等。

四、制订机械加工工艺规程的步骤

工艺规程的编制与生产类型有关。对单件、小批生产，一般只编出零件加工的工艺路线，确定工艺装备及每一工序的时间定额等；而大批生产，尤其是大量生产，工艺规程则要制订得尽量详细、具体，这样，才便于组织生产和指导生产。

制订工艺规程，一般可参考下列步骤进行：

1． 根据生产纲领确定生产类型，对大量生产要确定生产节拍，对成批生产要求出批量；

2． 研究与分析产品装配图、零件工作图及有关技术文件，并对零件图进行工艺分析，了解零件的工艺特点和加工难点，熟悉并分析同类型产品或零件在国内、外现行的生产方法及工艺特点，以供参考与借鉴；

3． 确定毛坯的种类、制造方法及尺寸；

4． 选择定位粗、精基准；

5. 拟订工艺路线，它是制订工艺规程的核心。其主要内容是：诸表面加工方法的选择、重要表面加工方案的确定、加工阶段的划分、工序集中与分散的考虑、加工顺序的安排等。拟订工艺路线时，最好提出几个方案，通过分析比较，择优选用；

6. 确定各工序采用的机床，当需要改装设备或设计专用机床时，应提出设计任务书；

7. 确定各工序的刀、夹、量具及辅助工具，对需要的专用刀、夹、量具提出设计任务书；

8. 确定各工序（或工步）的加工余量、达到的工序尺寸及公差；

9. 确定各工序的切削用量和工时定额；

10. 提出各主要工序的技术要求及检验方法；

11. 填写工艺文件。

应当指出，上述步骤只是制订工艺规程的大致过程。在实际制订过程中，各个步骤应根据具体情况、灵活掌握，有的则需要交替地进行。因为在确定某些因素的过程中，其它的一些因素才能逐步地确定。例如，解决夹具结构问题时，可能要修改工序顺序；确定切削用量时，有时还需要重新考虑刀具的选择等等。

制订工艺规程，尤其是一些关键零件的工艺规程，必须广泛征求工人的意见，集中他们的智慧与经验，并注意在实际生产中进行验证。另外，在生产过程中，常常会发现未曾考虑到的问题，零件的生产条件也在不断改变，技术革新和企业管理的改革都需要对工艺规程做不断地修订，使其不断完善。

第二节　根据生产纲领确定生产类型

制订工艺规程，必须首先根据生产纲领确定生产类型。因为只有确定了生产类型，才能确定毛坯的制造方法，零件的加工方案，加工设备的类型以及车间布置等一系列问题，使所制订的工艺规程与生产类型相适应。

大量生产通常采用流水作业线，生产的节奏性很强，工件按照规定的工艺过程顺序通过各个工作地，并按一定的生产速度连续不断地进行加工和生产产品。所以在设计大量生产的工艺规程时，必须考虑生产的节奏。所谓节奏（或节拍）就是每生产出一个零件（或装配出一个部件或整个产品）所需要的时间间隔。它的计算公式如下

$$\tau = F/N_L$$

式中　τ——节奏，min；

F——全年有效工作时间，min；

$$F = (365-52-7)\times 工作班数 \times 8 \times 60$$

N_L——零件的生产纲领。

在流水线上，要求各个工序的加工复杂程度大致相同，以保证各个工序时间不超过节奏或与之成整倍数，从而使各工序能均匀一致和不间断地连续生产。

在成批生产中，要决定每次投料时的批量。正确选择批量的大小，对成批生产的经济效果有重要影响。在产品的生产纲领已确定的情况下，采用的批量愈大，则产品轮番生产的次数就愈少，生产过程比较稳定，为更换品种花费在调整设备和工艺装备等准备结束工作上的时间和费用少，有利于提高劳动生产率和设备利用率。但加大批量，会延长每批产品的生产

周期，增加生产中的在制品数量，增加占用的生产面积和仓库面积，增加流动资金占用量和在制品库存保管费用等。反之，批量愈小，生产中在制品数量就愈少，与在制品数量有关的各项费用支出就可相应减少。但生产中产品更换频繁，增加了准备结束工作的工作量，使劳动生产率和设备利用率降低，而使准备结束工作费用增加。因此，为提高成批生产的效果，应全面地综合考虑上述各方面的因素，用科学的方法来确定产品的生产批量。

确定批量的方法，常用的有以期定量法、最小批量法和最小费用法（或称经济批量法）等三种。由于后两种方法牵涉到一些具体数据，故在此从略。

以期定量法是根据已定的标准生产间隔期来计算批量的一种方法。所谓生产间隔期是指相邻两批同种产品投入生产（或出产）的时间间隔。批量的计算公式如下

$$N_p = T \cdot Q$$

式中　N_p——批量；

T——生产间隔期（如一周、一旬、半月、一月、一季等）；

Q——计划期平均日产量。

采用以期定量法确定的批量，常和月产量成倍比关系，生产管理上比较方便，但它对经济效果的考虑则较粗略。

第三节　零件图的研究与分析

制订加工工艺规程时，必须首先对产品装配图进行研究与分析，熟悉该产品的用途、性能及工作条件，从而明确各零件在产品中的地位与作用。然后对零件图进行审查和分析。

一、检查零件图的完整性与正确性

零件图是制造和验收最基本的依据，要检查图纸是否有足够的视图，视图关系是否正确；尺寸、公差、表面粗糙度以及其它技术要求是否标注齐全，如有错误或遗漏之处，应予提出。

二、分析零件图的技术要求是否合理

零件图的技术要求是指加工表面的尺寸精度、形状精度、各表面之间的位置精度、表面的加工质量、热处理、表面处理等方面的一些要求。这些要求越高，加工就越困难，加工成本也就越高，因此，必须在了解产品工作性能以及零件在产品中的作用和工作条件的基础上，审查所规定的技术要求是否合理。

三、审查零件材料的选用是否恰当

在满足零件性能要求的前提下，应尽量选用价格低廉、来源充足的材料。对零件提出的热处理要求，应与选材相适应。

四、对零件的结构工艺性进行审查

零件的结构特点对其机械加工工艺过程的影响很大。使用性能完全相同而结构不同的两个零件，它们的制造成本可能有很大的差别。因此，对零件的结构应按第四章零件机械加工工艺性所提出的要求进行审查。在保证零件在产品中的使用性能的前提下，尽量改善其工艺性。

零件图纸经过审查后，如果发现图纸中存在问题，应及时提出，并与设计人员进行共同研讨，按照技术管理制度对图纸进行必要的修改或补充。

通过零件图的审查，工艺人员对以下几点应该有一个明确的概念，即：

1. 零件的结构特点与工艺特点；

2. 零件上的主要设计基准；

3. 零件上的主要技术要求和技术关键（对于工艺上难于达到的技术要求，特别是对制订工艺方案起决定作用的技术要求，事先要有考虑，以便在制订工艺规程中采取有效措施加以重点保证与合理解决）。

上面三点，对于毛坯的选择，定位基准的选择，主要表面应采用什么加工方法和所需的加工次数、加工顺序、安装方法等均有密切的关系，明确了这些，便为以后合理地制订工艺规程提供了必要的准备。

第四节 毛坯的选择

毛坯的种类和制造方法，对工件质量、加工方法、材料利用率、机械加工劳动量和制造成本等都有很大的影响。所以，要合理地选择零件的毛坯种类。

一、毛坯的种类

机械加工中常用的毛坯有以下几种：

（一）铸件

铸件是应用较广的一种毛坯，但因武器零件的特殊性，在自动武器生产中应用较少。个别武器零件，如54式12.7mm高射机枪的制退器、旋回架座为砂型铸钢件；大口径炮管为离心铸造件；自动武器的表尺座、准星座、导气箍等零件毛坯是熔模铸造件；而美M16自动步枪的机匣是铝合金压铸件。

（二）锻件

锻造毛坯组织结构比铸件致密，金属纤维具有方向性，从而提高了强度、冲击韧性和疲劳强度，在自动武器中应用较广。如54式12.7mm高射机枪机匣为自由锻件。模锻生产率高，毛坯尺寸精度较好、表面粗糙度较小、加工余量也小，在自动武器的零件毛坯选择中得到了广泛地应用。一些重要零件，如枪机、枪机框、枪尾等常采用模锻件，精锻是一种全部或局部无余量或少余量的锻造方法，锻件质量好、生产率高、节约材料、劳动条件也大有改善，故炮管毛坯、猎枪枪管及枪、炮管膛线已采用旋转精锻毛坯。

（三）型材

由钢厂按标准轧制的或根据订货单位要求轧制不同形状断面的钢材称为型材。型材分热轧和冷拉两种。在自动武器制造中，很多零件的毛坯采用型材。如某些枪管用圆钢，矩形机匣用扁钢，圆筒形机匣用无缝钢管作毛坯等等。对于某些断面不规则的零件，只要生产量大，便可向钢厂专门订货，如56式半自动步枪的弹仓盖卡笋、空仓挂机、表尺游标体、闭锁衬铁等都是专用型材订货的异型钢材。有的工厂自己采用连续滚轧设备将现成的型材轧制成所要求的断面，作某种零件的毛坯。

（四）冷冲压件

冷冲压件一般采用4mm以下的薄钢板经不同冲压工序制成工件，外形和结构可以相当复杂；坯件只需少量机械加工（或不加工）即可制成零件。这种坯件用材少，零件质量小，生产效率高，机械加工量少，是一种先进的坯件制造方法，适用于大批大量生产。在自动武器

制造中，冷冲压件约占10～15%，而在某些自动枪及枪架中，冷冲压件占50%以上。

（五）组合毛坯

当零件尺寸很大或结构过分复杂不宜采用单一的毛坯时，可将毛坯分成几件，先分别制出，然后组合为一整体，称为组合毛坯。常用有冲-焊结构、锻-焊结构和铸-焊结构。这种毛坯，既节省材料，又能减少制造费用，所以经济效果较好。在自动武器制造中，特别是大型枪架制造中，广泛采用冲压焊接结构。

（六）冷挤压件

冷挤压适用于批量大、形状简单、尺寸小的零件。有色金属和钢质件均可挤压。挤压零件精度高，表面粗糙度较小，经冷挤压后不需切削加工即可使用。63式自动步枪的阻铁为冷挤压件。

（七）塑料制件

塑料工业的飞速发展，塑料性能的不断提高，原来需要用钢材制造的某些零件，现在已采用塑料制造。塑料可用注射、压制、浇铸、挤出、吹塑、真空和压缩空气等方法成型。有些制品成型后即可使用，有些则需经过若干后续加工才能使用。在自动武器制造中，例如握把、护木、手柄、水准器、油壶等已用塑料制造。在国外，枪托、供弹具、击发发射机构等也用塑料制造。例如奥地利的AUG枪族，全枪156个零件，其中塑料件为32件，占全部零件的20.5%。采用塑料件，质轻成本低，生产效率高，因此大有发展前途。

二、毛坯的选择

选择毛坯时，应根据生产纲领、实际生产情况和对零件的具体要求而定。

选择毛坯时，应考虑以下几个问题：

1．零件的材料及其机械性能要求　零件的材料及其机械性能在大多数情况下已决定了毛坯的种类。例如零件材料为铸铁，那么就只能用铸造毛坯，若零件系重要钢质件，且机械性能要求较高，则一般应用锻造毛坯。

2．零件的结构形状与尺寸大小　零件结构形状复杂，一般应用铸件或模锻件；毛坯尺寸较大，往往不能采用模锻，压铸和精铸；外形特殊、尺寸又小的零件，由于机械加工较困难，通常采用精密的毛坯制造方法，如熔模铸造、压铸等，以最大限度减少机械加工量。

3．生产规模的大小　它在很大程度上决定了采用某种毛坯制造方法的经济性。当零件的产量较大时，应采用较高精度和较高生产率的毛坯制造方法，这样，用于毛坯制造而购置的设备费用，可由材料消耗的减少和机械加工费用的降低来补偿；零件的产量较小时，应选择精度和生产率较低的自由锻造的锻件和手工造型的铸件等，这样，有利于总的加工成本的降低。

4．工厂的现有生产条件　选择毛坯时，还应考虑本厂毛坯车间的现有设备和技术水平，不能脱离实际，否则便无法实现。此外，还应注意寻求外协的可能性，以便促进全社会毛坯制造专业化生产的发展和从整个生产过程上取得较好的经济效益。

对于自动武器的零件来说，由于零件较小，受力较大，形状复杂，要求质量小，且生产量大，故一般采用生产率高、精度较好的毛坯制造方法，如锻件、型材、冷冲压件、精密铸造件和组合毛坯。

三、毛坯尺寸的确定及毛坯图的绘制

1．　毛坯尺寸的确定

毛坯的制造尺寸等于零件尺寸加毛坯总的加工余量。确定毛坯尺寸的方法有两种：

（1）计算法　这种方法就是按加工余量计算出毛坯尺寸，也就是通常所说的“倒推法”。先根据零件表面的技术要求，选定表面最后的加工方法，然后再确定这一加工方法前面所经历的加工工序，算出每个工序的加工余量，再把总的加工余量算出来，零件成品尺寸加上毛坯总的加工余量即为毛坯的尺寸（当然还要考虑毛坯制造工艺上的特点，如分型面、拔模斜度等的影响）。这种方法是科学的，但其工作量大，设计工作十分繁杂，有时甚至要等零件工艺规程编完之后才能最后确定毛坯的尺寸，从面影响了毛坯车间的工艺准备工作，同时对大多数精度要求不高的表面也无必要去求毛坯各表面的总余量。因此，这种方法在实践中用得非常少。

（2）查表法　它是将不同制造方法的毛坯，根据其生产类型、结构特点、表面长度，断面尺寸等按经验统计原理制出各种毛坯加工余量表，在决定毛坯尺寸时，只要查表就可确定加工余量，把它加在零件尺寸上，便可求得毛坯的尺寸，这样，大大简化了毛坯设计工作。

2．绘制毛坯图

对铸件、锻件、组合毛坯（冲-焊结构除外）需要绘制毛坯图。采用型材作为毛坯时，通常先用分析计算法求出型材的最小断面尺寸，并据此选用相近而略大的型材规格，最后在工艺规程中用草图表出型材的尺寸及下料长度即可。

在决定毛坯轮廓形状及尺寸时，应使其符合该种毛坯制造工艺性的要求。在绘制毛坯图时，小零件，通常按1:1绘出，成品毛坯在图上用实线表示，并在其中用双点划线勾出零件基本外形轮廓，以清楚地看出主要表面的加工余量。零件少数主要尺寸可在图上用括弧注出，同时毛坯尺寸应力求与零件尺寸相对应，以便检查毛坯余量和毛坯尺寸。毛坯图还应说明有关事项。

图5-1所示为枪机的毛坯图（模锻件）。在毛坯种类和制造方法确定以后，按查表法查出总余量，在零件图的基础上便可初步确定毛坯的主要尺寸，然后再考虑毛坯制造上的工艺要求，如分型面、拔模斜度、圆角半径等等，最后确定毛坯的尺寸，并绘出毛坯图和提出相应的毛坯技术要求。将零件图的外形用双点划线画在毛坯图的轮廓里，以表示各加工表面的加工余量。

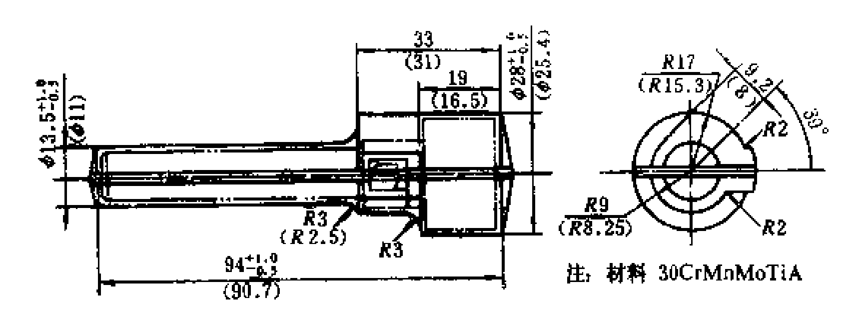


图5-1　枪机毛坯图（模锻件）

毛坯图可由工艺人员拟订，但须经冶金人员进行技术审查和必要的修改，才能成为正式的毛坯图。也可以由冶金人员根据零件图并参照生产规模和现有毛坯的生产条件，绘出毛坯图，并经机加工艺人员核查最后成为毛坯图。总之，毛坯图涉及到机械加工和毛坯制造两个方面，应互相协调完成。

第五节　定位基准的选择

一、基准的概念

根据产品或零件的功用以及结构和工艺上的要求，用以确定产品或零件上其它面、线、点位置所依据的那些面、线、点称为基准。

根据基准的作用不同，基准可分为设计基准和工艺基准两大类。

（一）设计基准

在设计零件时，用以确定零件图上其它面、线、点位置所依据的那些面、线、点，即标注设计尺寸的起点，称为零件的设计基准。

（二）工艺基准

在产品和零件制造过程中，为了加工及装配的需要所选定的作为依据的那些面、线、点，叫做工艺基准。按其用途的不同，工艺基准又可分为原始基准、定位基准、度量基准和装配基准。

1. 原始基准　在机械加工的过程中，在工序卡片的工序图上，用以确定工件被加工表面位置所依据的面、线、点称为原始基准。它又叫工序基准。

2. 定位基准　在机械加工中，工件在机床或夹具上安装时用以确定被加工表面位置所依据的面、线、点称为定位基准。根据定位基准的情况，它又可分为粗基准（定位表面没有经过加工的）和精基准（定位表面已经过加工的）。

3. 度量基准　用于检验零件已加工表面的尺寸及其相互位置所依据的面、线、点叫做度量基准。度量基准不仅用于度量，有时还用来对刀或机床调整，这时则分别称它为对刀基准或调整基准。

4. 装配基准　装配时用来确定零件或部件在产品中的位置所依据的面、线、点叫做装配基准。

以上仅就有关基准的概念作一简单介绍，详细的阐述及举例说明参阅《机床夹具设计》。

二、定位基准的选择

根据零件的结构形状和加工精度要求，正确地选择零件加工时的定位基准是安排工艺路线、选择工艺装备、保证零件加工质量的重要问题。所以，选择定位基准是制订零件机械加工工艺规程时要首先考虑的主要问题之一。

在零件的加工过程中，各工序定位基准的选择，应根据工件定位所要限制的自由度个数和基准选择的原则，正确地选择每个定位基准。

零件加工的最初工序，因工件是毛坯，未经过机械加工，故只能用粗（毛）基准定位；在以后的工序中，由于工件表面已经过加工，故可使用精（光）基准定位。在制订工艺规程时，总是先考虑选择怎样的精基准把各表面加工出来，然后考虑选择怎样的粗基准把作为精基准的表面先加工出来。

由于精基准和粗基准的情况和用途不同，所以在选择精基准和粗基准时所考虑问题的侧重点也不同。对于精基准考虑的重点是如何减少误差，提高定位精度以保证工件的加工精度，并且使加工过程操作简便；而对于粗基准考虑的重点是如何保证各加工表面有足够的余量，使不加工表面的尺寸和位置符合图纸要求。根据侧重点的不同，选择不同的基准有不同

的原则。

（一）精基准的选择原则

精基准的选择原则，归纳起来有以下五点：

1. 基准重合的原则 尽量选择工件被加工表面的设计基准作为定位精基准，以避免因基准不重合而引起的定位误差，使之易于保证加工精度，这就是基准重合的原则。

2. 基准统一的原则 如果工件以某一组精基准定位可较方便地加工许多表面时则选该组精基准来定位，这叫做基准统一的原则，或称基准不变或基准单一化的原则。

采用基准统一的原则有如下的优点：

（1）能简化工艺规程的制订，并使各工序所使用的夹具能够统一与简化，减少夹具设计与制造的时间，从而加速了生产准备和降低成本。

（2）可在一次装夹中加工出较多的表面（在产量较大的情况下，采用先进加工方法或专用设备同时加工各表面），因而能够提高生产率。

（3）在一次装夹中加工出来的各表面，它们之间的位置精度较高，易于保证位置精度要求，因为这时表面间的位置精度只取决于机床本身的精度和加工误差，而与定位误差无关。

选作统一基准的表面，一般都应是面积较大，精度较高的平面、孔以及其它距离较远的几个面的组合。例如机床箱体零件，在单件和中小批生产中，常用三个平面作为统一基准（主要定位基准为装配基面）；在大批大量生产中，常用一面两孔为统一基准。又如在轴类零件的加工中，常用顶尖孔作为统一基准。在自动武器制造中，某些矩形机匣和枪机，常以三个相互垂直的平面作为统一基准。

采用统一基准并不排斥个别工序采用其它基准。有的表面用统一基准加工并不方便，如果已有其它基准可以利用，这时就不一定要采用统一基准，若统一基准与加工表面的设计基准不重合，且因基准不重合误差过大而使加工精度达不到要求时，便应改用相应的设计基准作为定位基准。

3. 互为基准，反复加工的原则 两个有位置精度要求的表面，可以认为彼此互为设计基准。因此，当加工相互位置精度要求较高的表面时，常采用互为基准的办法来进行反复加工。这样，不仅符合基准重合的原则，面且在互为基准、反复加工的过程中，由于基准的精度越来越高，最终便能保证很高的位置精度。例如车床主轴的支承轴颈与主轴锥孔的同轴度要求很高，它是采用互为基准、反复加工来达到的。先以外圆定位车锥孔，再以锥孔（通过堵头的顶尖孔）定位粗磨外圆，然后又以外圆定位粗磨锥孔，再以锥孔定位精磨外圆及支承轴颈，最后以支承轴颈定位精磨锥孔，这样多次反复转换，提高了基准精度，因面能够获得很高的同轴度。在自动武器制造中，56式14.5mm高射机枪的机匣内孔与外圆有同轴度要求，其加工也是按这个原则来安排的。

4. 自为基准的原则 对于精加工或某些终加工，为了使其加工余量小且又均匀，以便获得较高的加工质量和生产率，可以选择被加工表面本身作为定位精基准，此即所谓自为基准的原则。至于被加工表面与其它表面之间的位置精度则由先行工序保证。例如，在导轨磨床上磨削床身导轨面时，为了使磨削余量小而又均匀，常在磨头上安装百分表，在床身下安装可调支承，以导轨面本身为精基准进行调整找正，如图5-2所示。其它如铰孔、拉孔、浮动镗孔、无心磨磨外圆以及研磨、珩磨、超精加工等都是自为基准的例子。

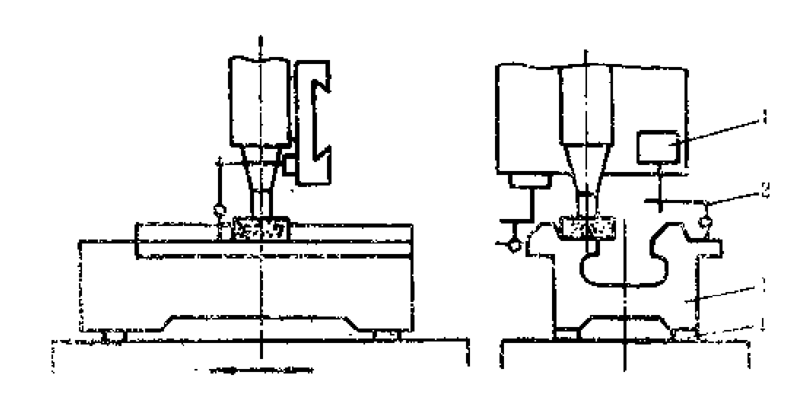


图5-2 按加工表面本身找正定位

1—表座；2—百分表；3—床身；4—垫铁

5． 所选精基准应使定位准确，夹紧可靠，安装与加工方便，夹具结构简单。为此，选作精基准的表面面积应尽可能大些，以提高定位精度，使工件安装方便可靠，减小夹紧变形。同时，还应考虑所选精基准是否有适合的定位夹紧机构可以采用等等。

（二）粗基准的选择原则

粗基准的选择原则，归纳起来有以下几点：

1． 如果首先要保证工件上加工表面与不加工表面之间的相互位置要求，则应以不加工表面作为粗基准；如果在工件上有多个不加工表面，则应以其中与加工表面的位置精度要求较高的表面作为粗基准，以利于达到壁厚均匀，外形对称等要求，这就是通常所谓的相互位置要求的原则。图5-3所示之工件，一般要求壁厚均匀。在铸造毛坯时，内孔2与外圆1有偏心，因此在加工时，如果用不需加工的外圆1作粗基准(用三爪卡盘夹持外圆1)加工内孔2，则内孔2与外圆1是同轴的，即加工后的壁厚是均匀的，但内孔2的加工余量不均匀如图5-3(a)所示；如选用内孔2作为粗基准（用四爪卡盘夹住外圆1，然后按内孔2找正），则内孔的加工余量均匀，但它与外圆1不同轴，加工后壁厚不均匀如图5-3（b）所示。显然，从保证相互位置要求出发，按图5-3（a）选用以不加工的外圆1作粗基准是正确的。

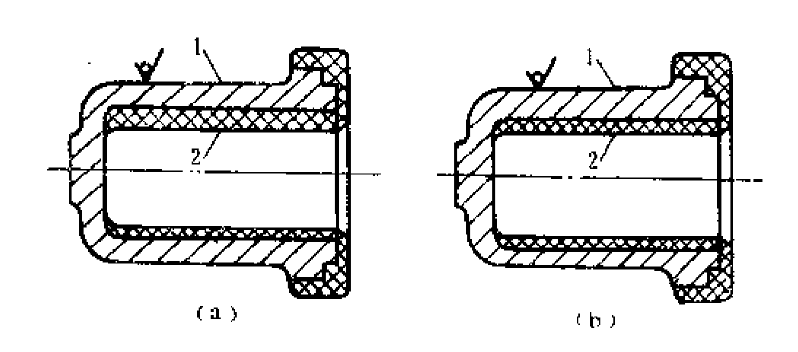


图5-3 粗基准的选择

（a）保证壁厚均匀；（b）保证加工余量均匀

图5-4所示为63式自动步枪的接套，毛坯采用异型钢材，弹匣槽两外侧面和顶杆孔凸起表面是不加工表面，但零件图要求弹匣槽两外侧面对接套两侧面的对称度为0.1mm，而顶杆孔凸起对接套两侧面的对称度为0.2mm，在这种情况下，应选与加工表面位置精度要求较高的弹匣槽两侧面作为粗基准才是合理的。

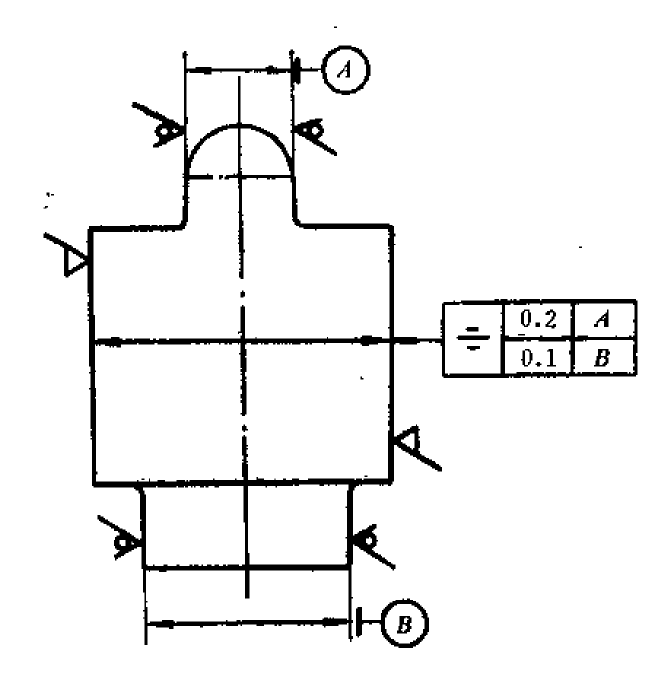


图5-4　63式自动步枪的接套

2．如果工件首先要保证某重要表面的加工余量均匀，则应选择该表面作为粗基准，即所谓余量分配原则。例如车床的床身，导轨面是最重要的表面，不仅精度要求高，而且要求导轨表面有均匀的金相组织和较高的耐磨性。因此在铸造床身毛坯时，将导轨面向下放置，以免其上产生气孔、夹渣等铸造缺陷。同时还希望加工时，导轨面上只切去一层较小而又均匀的余量，以保留导轨表层均匀面致密的组织，增加导轨的耐磨性。这时应选择导轨面作为粗基准。先以导轨面为粗基准，加工床身的底平面，然后再以加工过的底平面为精基准，加工导轨面，如图5-5（a）所示。反之，若先以底平面为粗基准加工导轨面，再以导轨面为精基准加工底平面，则毛坯的上下面平行度误差将使导轨而的加工余量增大，导轨而的质量得不到保证，如图5-5（b）所示。

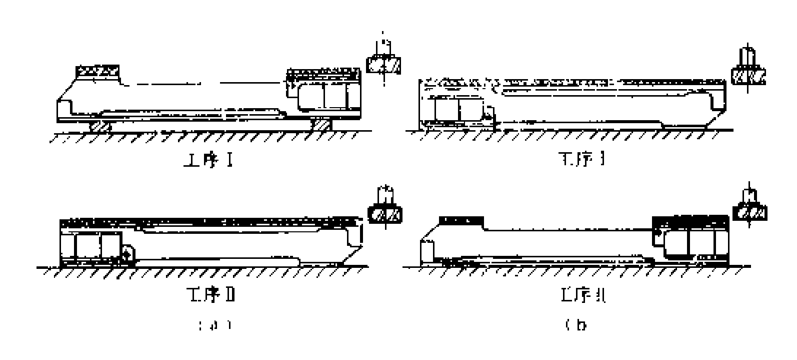


图5-5　床身加工粗基准选择的正误对比
（a）合理；（b）不合理

图5-6所示为汽车变速箱外壳的第一道工序，用装齿轮轴的轴承孔（要求余量均匀的重要表而）作为粗基准。加工上盖的接合面，然后以加工过的接合平面定位加工轴承孔，这样，既能保证轴承孔有足够的余量，而且余量比较均匀。由于加工余量均匀，切削力与弹性变形均匀，也不易产生振动，有利于提高轴承孔的形状精度和减小表面粗糙度。

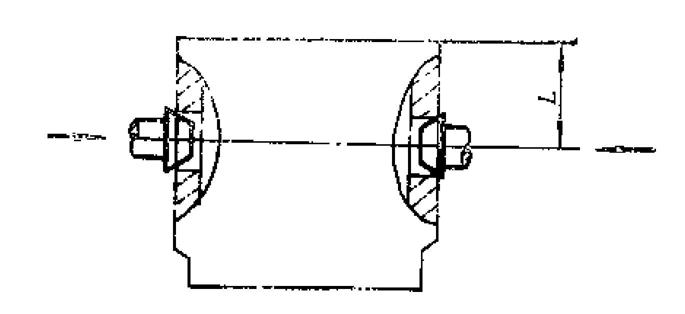


图5-6　变速箱外壳以重要表面为粗基准，加工上盖接合面

3．在不要求保证重要表面加工余量均匀的情况下，若零件上每个表面都要加工，则应该以加工余量最小的表面作为粗基准。这样选择粗基准，可使该表面在以后的加工中不致余量太小留下没有经过加工的毛坯表面。图5-7所示为一锻轴毛坯，大端的单面余量7mm，小端的单面余量4mm，大小端外圆有偏心5mm，若选大端外圆为粗基准，小端可能部分外圆加工余量不够而加工不出；若选余量较小的小端外圆为粗基准，虽有偏心却仍能保证大端有加工余量。对于铸造和锻造的轴套来说，通常是孔的加工余量大，而外圆表面的加工余量较小，这时就应以外圆表面为粗基准来加工内孔。

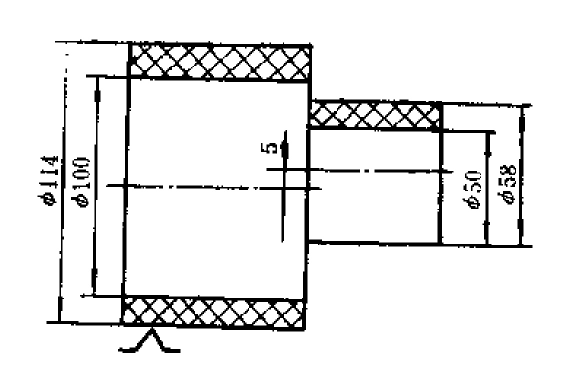


图5-7　阶梯轴粗基准的错误选择

4．选作粗基准的表面，应尽可能平整、光洁和有足够的尺寸，不允许有锻造的飞边、铸造的浇口、冒口或其它缺陷，不能选分型面作粗基准，同时还必须注意到铸造偏箱及型芯移动等所造成的缺陷，以保证定位准确、夹紧可靠，夹具结构简单、操作方便。

5．在一般情况下，同一个尺寸方向上的粗基准，只能使用一次，不能重复使用。这就是不重复使用粗基准的原则。因为粗基准本身是毛坯表面，精度差，粗糙度也大，如果在两次安装中，重复使用同一粗基准，则加工出来的表面之间将会有相当大的位置误差。例如图5-8所示之工件，以毛面B作为粗基准加工表面A，如果在调头加工表面C时再以B为定位基准，由于B很粗糙，尺寸和形状误差很大，重装一次位置就完全变动，结果使C和A不能保证同轴。因此在加工C时应当以已加工表面A作定位基准。

上述粗基准的选择原则，每一条都只说明一个方面的问题，实际应用时往往会出现相互矛盾的情况，这就要求全面考虑，灵活运用，保证主要要求。当运用上述原则对毛坯进行划线时，还可通过“借”的办法，兼顾以上各原则（主要是前三条原则）。

（三）辅助基准的应用

工件定位时，为了保证被加工表面的加工精度，通常优先选择其设计基准或装配基准为

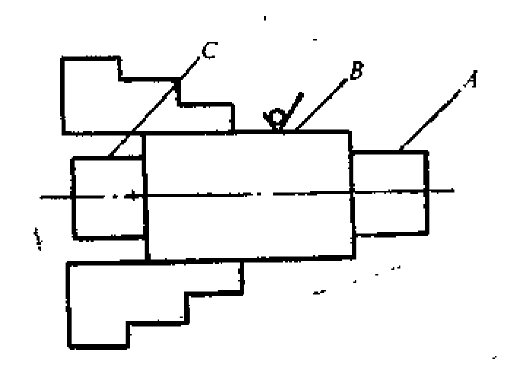


图5-8　重复使用粗基准示例

定位基准，因为这些基准一般均为零件上的主要工作表面。但在实际生产中，经常会遇到这样的情况，工件上没有能作为定位基面用的恰当表面，这时有必要在工件上专门加工出定位基面，这种基面称为辅助基准。例如轴类零件加工中所用的顶尖孔；某些零件加工中为了提高定位的可靠性或易于实现基准统一所用的工艺凸台（工艺搭子）、工艺孔等等。此外，零件上某些设计基准不便于做定位基准，而其上某些次要的自由表面（非配合面），在工艺上宜作定位基准，这时便可提高该自由表面的加工精度和表面质量，将这一表面选作定位基准使用，这种表面也属于辅助基准。例如丝杠的外圆表面，从螺旋副的传动来看，是非配合的自由表面，但在丝杠螺纹的加工中，外圆表面是导向基面，它的圆度和圆柱度直接影响螺纹的加工精度，所以应提高其形状精度，并降低其表面粗糙度。在自动武器制造中，某些矩形机匣的设计基准之一是其上的纵向对称面，由于它不便作为定位基准，常采用其外侧面（自由表面）作为定位基准，为了保证位置精度（要求与枪管配合孔、与枪机框配合的槽均与机匣纵向对称面对称），这时将两侧面间的尺寸精度提高，并减少其表面粗糙度，这种提高精度作为定位用的表面也是辅助基准。

在某些情况下，由于工件上没有恰当的表面可作辅助定位基准，而需在工件上附加一个辅助件，利用辅助件上的表面作定位基准，这种基准通常叫做附加基准。例如主轴加工中使用的锥堵，枪管加工中使用的弹膛塞等均属这类基准。

第六节　工艺路线的拟订

拟订工艺路线是制订工艺规程中关键性的一步。工艺路线不但影响加工质量和生产率，而且还影响工人的劳动强度、设备投资、车间面积和生产成本等，因此应多提出一些方案，通过分析比较，择优选用。

拟订工艺路线除合理地选择定位基准外，还需要合理地解决下面四个问题。

一、表面加工方法的选择

根据被加工表面的技术要求，确定其加工方法及所需的加工次数。

机械零件都是由一些简单的几何表面如外圆柱表面、内孔、平面、螺纹表面、齿形表面及其它一些成形表面所组合而成，因此，任何零件的工艺路线也就是这些表面工艺路线的组合。而表面加工的工艺路线又受多方面因素的影响，因此在选择表面加工工艺路线（加工方法）时必须考虑这些因素。

（一）选择表面加工方法时应考虑的因素

1．选择各种加工方法的经济精度和表面粗糙度应与被加工表面的技术要求相适应。但要注意，经济精度和表面粗糙度不是固定不变的，而是随着生产技术的发展以及工艺水平的提高而提高的。例如外圆磨床一般可达IT7级精度，表面粗糙度$Ra0.4$，但采取适当措施提高磨床精度及改进磨削工艺后，在普通磨床上就能进行镜面磨削，精度可达IT6级以上，表面粗糙度可达$Ra0.1 \sim 0.012$。此外，在大批大量生产中，为了保证高的生产率和高的成品率，常把原用于小粗糙度的加工方法用于获得较差的粗糙度，例如连杆加工中采用珩磨达到表面粗糙度$Ra0.8$；曲轴加工中用超精加工获得表面粗糙度$Ra0.4$。

2．被加工材料的性质及其所要求的硬度。淬火钢，由于硬度高，不宜采用金属刃具加工，而必须采用磨削的方法；硬度较低而韧性很大的材料或有色金属，一般不宜采用磨削加工，通常采用高速镗孔（金刚镗）或高速精密车削的方法进行精加工。

3．零件的结构形状及加工表面的尺寸大小。例如IT7级精度的孔，采用镗削、铰削、拉削和磨削均可达到要求，但在箱体上的孔，一般不宜选用拉孔和磨孔，而是孔径大时选镗孔，孔径小时选铰孔；形状不规则的工件不能采用无心磨削；小工件（如喷油器的针阀）的外圆不能采用超精加工。

4．生产类型。这是属于生产率与经济性方面的问题。在大批大量生产中可采用专用的高效率设备和专用工艺装备，例如平面和孔可采用拉削加工来取代普通的铣、刨和镗孔方法；轴类零件可采用半自动液压仿形车床来加工；盘类或套筒类零件可用单能车床加工。此外，还可采用精化毛坯的方法，以减少切削加工量。但是在单件小批生产中，只能采用通用设备、通用工艺装备和一般的加工方法。

5．充分利用本厂本车间现有设备及工艺技术条件。应发挥工人的积极性和创造性，不断改进现有加工方法和设备，推广新技术，提高工艺水平，使设备负荷趋于平衡等。

（二）典型表面的加工方案

1．外圆柱面的加工方案

外圆柱面的加工，主要是车削和磨削。当表面粗糙度要求小时，则还需采用光整加工。

外圆车削适用于除淬火钢以外的各种金属，它可分为粗车、半精车、精车和细车。粗车的经济精度为IT13～11级，表面粗糙度$Ra50 \sim 12.5$。如果外圆精度和粗糙度要求低，粗车也可作为工件表面的最终工序。半精车的经济精度为IT9～8级，表面粗糙度$Ra6.3 \sim 3.2$，故半精车可以作为中等精度表面的最终工序。半精车又可作为磨削和其它精加工工序以前的预加工。半精车与加工余量和进给量较小条件下的粗车比较，两者没有原则区别。精车一般作为最终加工工序，或者作为光整加工的预加工。精车的经济精度为IT7～6级，表面粗糙度$Ra1.6 \sim 0.8$。对于较高精度的毛坯，则可不经过粗加工，而直接进行精车或半精车。细车是一种光整加工方法。细车后工件精度可达IT6～5级，表面粗糙度$Ra0.8 \sim 0.2$，有时能达粗糙度$Ra0.4 \sim 0.1$。加工大型精确外圆表面时，细车常用来代替磨削加工。细车还常用于加工有色金属件。

磨削多用于经淬火后外圆柱面的精加工。外圆磨削可分为粗磨（预磨）、半精磨、精磨和细磨。粗磨的经济精度为IT8～7级，表面粗糙度$Ra1.6 \sim 0.8$；半精磨的经济精度为IT7～6级，表面粗糙度$Ra0.8 \sim 0.4$；精磨的经济精度为IT6级，表面粗糙度$Ra0.4 \sim 0.2$；细磨的经济精度为IT6～5级，表面粗糙度$Ra0.2 \sim 0.1$。对不需要热处理的工件，可在车削之后，

采用一次磨削，精度可达IT8～7级，粗糙度Ra1.6～0.4。

光整加工的主要作用是改善零件的表面质量，但对于细车、细磨以及研磨等加工方法来说还能有效地提高零件的尺寸精度和形状精度。

外圆柱面的加工方案见表5-1。

表5-1 外圆柱面的加工方案

序号	加工方案	经济精度等级（IT）	表面粗糙度Ra（μm）	适用范围
1	粗车	13～11	50～12.5	适用于淬火钢以外的各种金属
2	粗车→半精车	9～8	6.3～3.2	
3	粗车→半精车→精车	7～6	1.6～0.8	
4	粗车→半精车→精车→滚压（或抛光）	7～6	0.2～0.025	
5	粗车→半精度→磨削	7～6	0.8～0.4	主要用于淬火钢，也用于未淬火钢，但不宜用于有色金属
6	粗车→半精车→粗磨→精磨	6～5	0.4～0.1	
7	粗车→半精车→精磨→精磨→超精加工（或轮式超精磨）	5	0.1～0.012	
8	粗车→半精车→精车→金刚石车	6～5	0.4～0.025	主要用于要求较高的有色金属
9	粗车→半精车→粗磨→精磨→超精磨（或镜面磨）	5级以上	0.025～0.008	主要用于极高精度的外圆加工
10	粗车→半精车→精车→精磨→研磨	5级以上	0.1～0.008	

在自动武器制造中，常用的外圆柱面的加工方案为表中序号2、3、5、6。

2． 孔的加工方案

孔加工常用的方法有：钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、拉孔、磨孔、胀孔（挤压）、珩磨、研磨和抛光等。孔加工方法的选择比外圆柱面加工要复杂，需要考虑毛坯制造方法、材料、零件的结构特点、孔径大小、长径比、精度和粗糙度要求及生产规模等因素。对于技术要求较高的孔，很难用一两种加工方法完成，而需采用几种不同加工方法顺序进行。对于直径小于30mm的孔，毛坯一般都是实心的，因此第一道工序都是钻孔。对于直径大于50mm的孔，毛坯一般都铸或锻出孔，第一道工序用粗镗工序。直径在30～50mm的孔，毛坯上是否有孔，需视具体情况而定。如果孔位于大箱体零件上，则一般不铸，因为铸出的孔由于型芯在浇铸时的偏斜反而会给加工带来很大困难。如果孔位于中小零件上，则一般铸或锻出，以节约金属和减少加工工作量。直径较小的孔，用定尺寸刀具钻、扩、铰进行加工，可以提高生产效率，保证加工质量。孔径大于50mm时，一般就不适宜用钻、扩、铰等加工方法，而用镗孔来代替。为了发挥定尺寸刀具的优点，在精镗工序中，广泛使用镗刀块，镗刀块在镗杆中可以径向自由滑动，常称浮动（游动）镗刀块， 它可加工出IT7级精度、粗糙度Ra1.6的孔，生产效率高，因而广泛用在箱体零件的孔系加工。磨孔由于砂轮直径受孔径的限制，磨削速度太低，生产效率和加工质量都远不如外圆磨削，因此主要用于淬硬工件的加工。拉孔生产效率高，容易保证加工质量，因而用得比较广泛。但拉刀成本较高和拉削时有很大的轴向力，因此主要用在基准孔的加工和具有很大轴向刚度的盘形零件、短套筒、杆形零件的加工。拉孔只能拉削通孔，不能拉削盲孔。此外，箱体上的孔，不宜用拉孔，而应用镗孔或铰孔；淬火件只能用磨孔，有色金属件应用高速镗孔，这些都是要注意的。

孔的加工方案见表5-2。

表5-2　孔的加工方案

序号	加工方法	经济精度等级（IT）	表面粗糙度 Ra（μm）	适用范围
1	钻	13～11	12.5	加工未淬火钢及铸铁的实心毛坯，也可用于加工有色金属（但粗糙度稍差）孔径<（15～20）mm
2	钻→铰	9～8	3.2～1.6	
3	钻→粗铰→精铰	8～7	1.6～0.8	
4	钻→扩	11	12.5～6.3	同上，但孔径>（15～20）mm
5	钻→扩→铰	9～8	3.2～1.6	
6	钻→扩→粗铰→精铰	7	1.6～0.8	
7	钻→扩→机铰→手铰	7～6	0.4～0.1	
8	钻→（扩）→拉	9～7	1.6～0.1	大批、大量生产（精度视拉刀的精度而定）
9	粗镗（或扩孔）	13～11	12.5～6.3	除淬火钢外的各种钢材，毛坯有铸出孔或锻出孔
10	粗镗（粗扩）→半精镗（精扩）	9～8	3.2～1.6	
11	粗镗（扩）→半精镗（精扩）→精镗（铰）	8～7	1.6～0.8	
12	粗镗（扩）→半精镗（精扩）→精镗→浮动镗刀块精镗	7～6	0.8～0.4	
13	粗镗（扩）→半精镗→磨孔	8～7	0.8～0.2	主要用于加工淬火钢也可用于不淬火钢，但不宜用于有色金属
14	粗镗（扩）→半精镗→粗磨→精磨	7～6	0.2～0.1	
15	粗镗→半精镗→精镗→金刚镗	7～6	0.4～0.05	主要用于精度要求较高的有色金属
16	钻→（扩）→粗铰→精铰→珩磨 钻→（扩）→拉→珩磨 粗镗→半精镗→精镗→珩磨	7～6	0.2～0.025	精度要求很高的孔
17	以研磨代替上述方案中的珩磨	6级以上	0.1～0.008	

为了说明孔加工方法的选择，现以尺寸精度为H7、表面粗糙度Ra1.6～0.8的孔的加工方法选择为例，进行说明如下：

上述孔的加工，有四种加工方案可以采用：

（1）钻→扩→粗铰→精铰；

（2）粗镗→半精镗→精镗；

（3）粗镗→半精镗→粗磨→精磨；

（4）钻→（扩）→拉。

方案（1）用得最广。采用粗铰和精铰是为了保护用高速钢制成的精铰刀有更长的寿命。如采用硬质合金铰刀，则可取消粗铰，只铰一次便可达到技术要求。在成批生产中，常在立式钻床、摇臂钻床或六角车床上连续进行各工步的加工。在大批大量生产中，多在自动机床或组合机床上加工。此方案适用于直径$D<\phi50$mm的孔，因为孔径太大，则扩孔钻和铰刀太笨重，不便于制造和使用。工件材料应为未淬火钢或铸铁，对于有色金属虽可加工，但铰孔不易保证所需的粗糙度。

方案（2）多用于毛坯上铸出或锻出的孔，但孔径不宜太小，否则因镗杆太细而刚度差，影响加工质量。通常箱体零件加工采用这种方案。根据生产规模的不同，采用不同生产率的机床和夹具。

方案（3）最适合于需经淬火的工件。对铸铁及未淬火钢的工件，虽也可采用，但磨孔的生产效率较低。

方案（4）适用于中小型零件的成批和大量生产，因拉刀制造复杂，成本高。工件材料可为未淬火钢、铸铁及有色金属。孔不宜太长，一般不超过孔径的3～4倍为好。

为了进一步了解上述四种加工方案，现将其工艺特点综合起来，一一进行比较，如表5-3所示。

表5-3 四种加工方案工艺特点的比较

工艺特点	加工方法			
	铰孔	拉孔	磨削孔	精镗孔
经济精度	H7	H7	H7	H7
位置精度	不高	不高	高	高
表面粗糙度	差些	较小	小	小
生产率	一般	高	不高	一般
适用于工件的材料	各种	各种	钢	有色金属（钢）
能加工材料的硬度	HRC<40	HRC<40	不限	HRC<40
适用于工件的大小	不限	中、小工件	中、小工件	中、小工件
适用于孔的大小	中、小孔	中、小孔	不限	不限

由上表可见，对于H7的孔，如仅从尺寸精度来考虑，可从上述四种加工方法中任选一种即可达到要求，但如把各种加工方法的工艺特点结合零件的材料、结构、产量及经济性来考虑，那就可能只有一种是合理的。例如零件的材料为钢，硬度不太高；零件属中小零件；孔属中小孔；产量大，这时选用拉孔加工方案最为合理。

在自动武器制造中，由于武器零件外廓尺寸小，加工精度和表面粗糙度要求不是太高，且生产量大，所以常用的孔加工方案为表5-2中的序号1、2、3、4、5、6、7、8。

3. 平面的加工方案

平面的一般加工方法有铣、刨、拉、车等。平面的精密加工方法则有平面磨削、研磨和刮研等。

铣和刨是平面加工的主要方法。一般来说，铣比刨的生产率要高，所以铣削应用最广。精铣能得到表面粗糙度$Ra1.6$～0.8，不淬火的中小零件可用高速铣削来精铣。绝大多数有色金属均用高速铣削来加工，以获得较小的粗糙度和较高的生产率。但是对于窄长形表面，如床身导轨面，刨削的生产率不见得比铣削低。在生产车间里，牛头刨床逐渐被各种铣床所代替，而龙门刨床仍广泛用于大件的加工。牛头刨床一个突出的优点是万能性好，可方便地应用在各种各样的平面加工中，因此它主要用于单件、小批生产。车削主要用于圆盘面的加工，对于保证平面和内、外圆的垂直度特别有利。常与外圆及内孔在一次安装中加工。平面拉削，生产率高，适用于大量生产，一般用于不淬火零件的加工，粗精加工可在一次行程中完成。平面的精加工主要用磨削，适用于成批、大量生产中各种大小零件。对于不需淬火的大件，

也常用宽刀精刨进行精加工。平面的光整加工主要用研磨和刮研，前者主要用于淬硬件和小件，后者用于不淬硬件。

平面的加工方案见表5-4。

表5-4　平面的加工方案

序号	加工方法	经济精度等级(IT)	表面粗糙度Ra(μm)	适用范围
1	粗车→半精车	9～8	6.3～3.2	端面
2	粗车→半精车→精车	8～7	1.6～0.8	
3	粗车→半精车→磨削	9～8	0.8～0.2	
4	粗刨（或粗铣）→精刨（或精铣）	9～8	6.3～1.6	一般不淬硬的平面(端铣的粗糙度可较高)
5	粗刨（或粗铣）→精刨（或精铣）→刮研	7～6	0.8～0.1	精度要求较高的不淬硬平面批量较大时，宜采用宽刃精刨方案
6	粗刨（或粗铣）→精刨（或精铣）→宽刃精刨	7	0.8～0.2	
7	粗刨（或粗铣）→精刨（或精铣）→磨削	7	0.8～0.2	精度要求较高的淬硬平面或不淬硬平面
8	粗刨（或粗铣）→精刨（或精铣）→粗磨→精磨	7～6	0.4～0.025	
9	粗铣→拉	9～7	0.8～0.2	大量生产、较小的平面（精度视拉刀的精度而定）
10	粗铣→精铣→磨削→研磨	6级以上	0.1～0.008	高精度平面

在自动武器制造中，常用的平面加工方案为表中序号4、7、9、1、2等，一般不用刨，均用铣。

4．螺纹的加工方法

加工螺纹的方法有：用螺纹车刀或梳状车刀车螺纹；用丝锥、板牙或螺纹切头切制螺纹；用盘形铣刀、梳形铣刀、旋风铣头铣螺纹；滚压螺纹和磨螺纹等。车螺纹是应用最广、最简单的一种加工方法，其特点是：适应性广，不论尺寸大小的各种轮廓螺纹都可用车削加工；刀具简单，能用万能性设备获得较高精度的螺纹，但生产率较低，对工人的技术水平要求较高。铣螺纹的生产效率高，特别是用梳形铣刀和旋风铣头铣制螺纹的生产效率就更高，但由于是断续切削，表面粗糙度比车削大，精度也较车削稍低，常用于成批、大量生产。用丝锥、板牙加工螺纹适用于各种生产规模的小尺寸螺纹的加工，当产量少直径小时，一般均用手工操作，也可以用机床进行加工，它特别适用于非旋转体或大型零件上的小直径三角形螺纹的加工，它的生产率可高于铣削，但螺纹的精度不高。滚压螺纹是一种无屑加工方法，生产率高，加工精度高，螺纹强度好，它适用于材料的硬度不太高、生产量大的螺纹生产中。磨削螺纹是一种精加工方法，主要用在制造热处理后具有较高硬度和特别精密的螺纹。

5．圆柱齿轮的齿形加工方法

其齿形加工方法有：用仿形法加工齿形（用模数铣刀铣齿、用拉刀拉齿）；用展成法加工齿形：用滚刀滚齿，生产率较高，通用性大，常用以加工直齿、斜齿的外啮合圆柱齿轮、蜗轮和齿轮轴；用插齿刀插齿，生产率较高，通用性大，适用于加工内外啮合齿轮（包括阶梯齿轮）、扇形齿轮、齿条等；用剃齿刀剃齿，生产率高，主要用于齿轮滚插预加工后，淬火前的精加工；用挤轮冷挤齿轮，生产率比剃齿高，成本低，多用于齿轮淬硬前的精加工，以代替剃齿；用珩磨轮珩齿，多用于经过剃齿且已高频淬硬的齿形精加工；用砂轮磨齿，加工精

度高，生产率低，加工成本高，多用于齿形淬硬后的精加工。

6. 成形表面的加工方法

成形表面的加工方法有：按划线加工；用成形刀具加工；用靠模装置加工；用专用机床或仿形机床加工；用数控机床加工等。

按划线（或样板）加工，其生产率低，加工精度不高，对工人的技术水平要求较高，但不需专用设备和工具，适用于单件小批生产且精度要求不高的情况。

用成形刀具加工，其方法简单且生产率高，加工质量取决于刀具质量，由于刀具制造困难，成本也较高，主要应用于大批、大量生产。当成形表面的轮廓太复杂或尺寸太大时，则不宜采用成形刀具。

用靠模装置加工，生产中应用广泛，其加工精度较高，生产率也较高，但需设计、制造专用靠模装置，故只适用于成批和大量生产。除了在普通机床上加靠模装置外，还可采用专用机床或仿形机床来加工成形表面，其加工精度较好、质量稳定、生产效率高，但设备投资大，只适用于大批、大量生产。

用数控机床加工成形表面，具有广泛的通用性，能加工各种成形表面，特别是能加工那些用传统方法很难或不能加工的大型和复杂的工件；并且能节约大量的工、夹、模具，大大缩短了新产品的试制周期，提高了劳动生产率；减少人为误差，确保产品质量；能减低工人劳动强度；有利于中、小批生产实现自动化。但是，数控机床比一般机床贵，而且由于控制系统较复杂，需有专门的使用、维修人员，所以它比较适合于产品品种变换频繁，零件形状复杂，精度要求高且批量较小的工厂使用。

（三）选择表面加工方法时要注意的问题

1. 根据被加工零件主要表面的技术要求，先选定它的最后加工方法，然后再选定前面一系列预备工序的加工方法，即用“由后往前推”的方法来选定。在选定主要表面的加工方法之后，再选定各次要表面的加工方法。

2. 在被加工零件各表面的加工方法初步选定以后，还应综合考虑为保证各加工表面位置精度要求而采取的工艺措施。例如，几个同轴度要求高的外圆或孔，应安排在同一工序的一次安装中加工。这时对所选的加工方法可能做适当的调整。

3. 应使所选择的加工方法既满足加工技术要求，又符合整个工艺过程设计的合理性。

在零件各表面的加工方法选定以后，需要进一步确定这些加工方法在工艺路线中的大致顺序及位置，而这些顺序及位置的确定与加工阶段的划分有关。

二、加工阶段的划分

当工件的加工质量要求较高，在制订工艺路线时，往往要把加工要求较高的主要表面的工艺过程划分为粗加工、半精加工、精加工、光整加工等阶段。

（一）各加工阶段的任务

1. 粗加工阶段　切除各加工表面上的大部分余量，使工件的形状和尺寸初步接近于零件，同时为半精加工提供精基准。由于是粗加工，所以这一阶段的主要问题是如何获得高的生产率和保证精基准的加工质量。

2. 半精加工阶段　切去的余量介于粗、精加工工序之间，其任务是使主要表面达到一定精度，留有一定的精加工余量，为精加工作准备，并完成一些次要表面的最终加工（钻孔、攻丝、铣键槽等）。当工件需要在工艺过程中进行热处理（淬火）时，一般安排在本阶

段加工之后进行。

3．精加工阶段 切去的余量很少，其任务是保证各主要表面(需光整加工的表面除外)达到规定的尺寸精度和表面粗糙度要求（IT10～7级以上，Ra1.6～0.4以下）。

4．光整加工阶段 对某些具有很高的精度（IT6级以上）和很小的粗糙度（Ra0.2以下）的零件表面，需要采用光整加工，它切去的余量极小，主要是减小表面粗糙度和获得极高的精度。但它一般不用以纠正形状误差和位置误差。

（二）划分加工阶段的目的

划分加工阶段的主要目的是：

1．保证加工质量 工件在粗加工时，由于切除的余量较大，切削力大，需要的夹紧力也大，因而工艺系统的受力变形也较大，当工件刚性较差时尤为严重。同时，粗加工时，产生较大的热量，会引起工艺系统的热变形。此外，粗加工时，由于工件表面切去较厚一层金属，显著破坏了工件内部的内应力平衡状态，使得内应力重新分布，也会引起工件的变形。另外，加工余量大和不均匀也就不可避免地要产生振动。所有这些原因都使粗加工不可能得到较高的精度和较小的粗糙度。划分加工阶段以后，可使粗加工所造成的加工误差通过后续的半精加工和精加工得到纠正，同时精加工是在变形较小的情况下进行的，故容易保证零件的质量要求。精加工可用较高精度的表面作为定位基准，因此可减少安装误差。把粗糙度要求小的表面放在最后加工，可避免这些表面在加工中碰伤。由于划分加工阶段，阶段之间有一定的时间间隔，这不仅使粗加工产生的大量热量得到完全散发，而且在这一时间间隔里，还可进行自然时效，使工件消除内应力和充分的变形，以便在后续工序中得到纠正。

2．合理使用设备 加工过程划分阶段后，粗加工可采用功率大、刚度好和精度较低的高效率机床，充分发挥设备潜力，提高生产率；而精加工可在精度较高的机床上进行，以确保零件的加工精度；同时，由于精加工机床负荷较低，有利于长期保持高精度设备的精度，并且有利于合理配备操作工人的技术等级。可见，划分加工阶段以后，可使不同精度的机床各得其所，合理使用。

3．及早发现毛坯缺陷，避免工时浪费 粗加工切去的余量大，先进行粗加工比较容易暴露出毛坯本身的缺陷（如铸件的砂眼、气孔，锻件的裂缝等），及时报废，避免继续加工，不致造成更多的工时浪费。

4．适应加工过程中安排热处理的需要 很多工件在加工过程中要进行热处理。有了热处理工序便使加工过程自然划分成阶段。例如在精密主轴的加工过程中，粗加工后要安排去除应力的时效处理，以减少内应力变形对精加工的影响；半精加工后要进行淬火，这不仅容易满足零件的性能要求，而且淬火所引起的变形可通过其后的精加工工序予以消除；精加工后要进行冰冷处理及低温回火，最后再进行光整加工。

上述加工阶段的划分不是绝对的，要根据具体零件的结构特点、质量要求和毛坯情况等条件才能确定。例如某些精度要求不高、毛坯余量不大且比较均匀或已进行过时效处理的零件，以及在转塔车床、自动车床上加工的小零件等，可以不划分加工阶段，一次加工完成。某些重型零件，由于安装、运输费时，而且困难，常在一次安装下完成全部粗加工和精加工。粗加工后松开夹紧，以减小夹紧力的影响，并使工件消除内应力及发生相应的变形，然后再用较小的力重新夹紧进行精加工。对于某些毛坯余量特别大、表面极其粗糙的工件，在粗加工前还可设置去皮加工阶段，常称为荒加工。总之，对某些零件的加工工艺过程划分成阶

段是必要的。但是工艺过程的阶段划分并不是越细越好。否则就会走向反面，使工序数量增多，生产组织管理复杂，生产周期延长，导致生产率下降和产品成本的提高。因此，在确保加工质量的前提下，应尽量不要把加工阶段划分得太细。

划分加工阶段是对整个零件的加工过程而言的，不能以某一表面的加工或某一工序的性质来区分。例如工件定位精基准，在粗加工阶段就需要加工得很精确；在精加工阶段也可以安排一些次要表面（如小孔等）的粗加工。

对于自动武器上的零件，由于加工精度要求不很高，表面粗糙度也不是很小，且绝大部分零件要经过热处理（淬火），所以对大多数零件来说，常分为粗、半精、精(有时也分为粗、精、光加工及修整)三个或粗、精两个加工阶段。

三、工序的集中和分散

选定了各表面的加工方法和划分加工阶段之后，零件加工的各个工步也就确定了。这时便可将同一个阶段里的若干工步组成不同工序。组合时可以将工件的加工工步集中在少数几道工序里完成，也可以将加工工步分散在较多的工序中完成。这就是"工序集中"和"工序分散"的问题。

（一） 工序集中

就是使零件的加工集中在少数工序中完成，亦即每一道工序所包含的加工内容比较多，且常采用复合工步。工序集中的极限是零件整个加工过程只有一道工序，在一台普通机床或自动机床上完成零件的全部加工。

工序集中的特点：

1. 有利于采用高生产率的专用设备（如多刀机床、多工位机床等）和工艺装备（如多位夹具、组合刀具等），可以大大提高劳动生产率。

2. 减少了工序数目，缩短了工艺路线，从而简化了生产计划和管理工作。

3. 减少了工件安装次数，缩短了辅助时间，不仅有利于提高生产率，同时还由于在一次安装中加工许多表面，故易于保证这些表面间的相互位置精度。对于重型零件来说，还可减少搬运和安装的困难。

4. 减少了设备数量、操作工人的数量和生产面积。

5. 减少了工序间的运输量，缩短了生产周期。还可减少运输过程中零件碰伤的次数（实践证明，对精密零件，这是一个值得注意的质量问题）。

6. 采用专用设备和工艺装备需要更多的投资，并且增加了生产技术准备的工作量，延长了生产准备时间；需要技术水平高的调整工人；调整、维修费时费事；转换新产品比较困难。

7. 大量运用复合工步，各工步切削用量的选择必须照顾全局，因而不可能都处于最佳状态。

（二） 工序分散

就是把零件的工艺过程划分为许多工序，使每个工序所负担的工艺内容尽量少。工序分散的极限是一道工序仅有一个工步。

工序分散的特点：

1. 采用的设备和工艺装备简单，调整方便，操作工人便于掌握，要求工人的技术水平较低。

2. 大部分工序都是简单工步，可选用最合理的切削用量，能充分发挥设备潜力，减少

机动时间，提高生产率。

3. 便于组织流水生产线，生产准备工作量小，容易适应产品的变换，便于军工生产的战备动员。

4. 工艺路线长，工序数目多，设备数量多，操作工人多，生产面积大。

5. 工序间运输量大，增加辅助工时和运输设备及费用，增加了零件碰伤的机会而影响质量。

工序集中和工序分散各有特点。在拟订工艺路线时，工序集中和分散的程度，即工序数目的多少，主要取决于生产规模、零件的结构特点及其技术要求。单件小批生产时，为了简化生产的计划管理工作，多将工序适当集中，使各通用机床完成更多表面的加工，以减少工序数目。批量大时，既可按工序分散原则组织流水生产，也可利用高生产率的专用设备，按工序集中原则组织生产。对于重型机械的大型零件，为了减少工件装卸和运输的劳动量，工序应适当集中；对于刚性差且精度要求高的精密零件，工序则应适当分散；对于相互位置要求较高的几个有关表面，为易于保证质量，往往安排在一个工序、一次安装中完成，对于任务急而精度要求很高的中小型零件的单件小批生产，应按工序分散原则安排工艺路线，因为这样可使生产技术准备工作简单、投产快，并使粗精加工严格分开，既可及时完成任务，又可确保加工质量。

目前，生产的发展多趋向于工序集中。建立在高度生产自动化基础上的工序集中是长期提高生产率的根本途径，也是机械工业的发展方向。但是也不能忽视工序分散的原则，例如在急需某种产品而来不及准备工序集中所需的复杂工装时；产品对象经常更换如按工序集中就要积压大量专用设备与工装时；加工小而简单的零件采用工序分散较为经济时以及适应战备动员等情况下，仍然需要应用工序分散的原则。

在自动武器生产中，我国采用的是工序分散的原则。许多工序只包含一个工步，但这并不是绝对的，在分散中间仍有集中，有的工序并不适用于完全分散，例如对孔进行连续的钻、扩、铰时，常常是在一个工序中完成，而不分为三个工序。前些年，有些兵工厂曾研制并试用过按工序集中原则设计的组合机床及自动线，效果也比较好，但由于某些原因没有得到采用和推广。在国外，自动武器的生产仍然多采用工序分散的原则，但随着科学技术与生产的发展，已有不少厂家采用了工序集中的多工位组合机床及自动线，生产率得到较大的提高。

四、加工顺序的安排

加工顺序的安排一般可按下述各项进行。

（一） 机械加工工序的安排

安排机械加工工序时应考虑下列原则：

1. 基面先行 在加工过程开始时，先用粗基准把精基准加工出来，再用精基准加工其它表面，即前面的工序要为后面的工序准备基准。当基准不止一个时，应按照基准转换的次序和逐步提高精度的原则来安排各基准面的加工。先粗加工各基准面，然后精加工各基准面，采用互为基准，反复加工。在由粗加工阶段进入精加工阶段时（亦即对主要表面进行精加工前），一般要对精基准再安排一次精加工或修复加工，以提高定位精度。例如轴类零件的机械加工工序的安排一般都是先加工两端的顶尖孔，然后再以顶尖孔作为精基准，粗加工、半精加工所有的外圆表面。在精加工外圆以前，通常要先修一下顶尖孔，尤其是对全部淬硬的

轴，一般在淬硬后都要研磨顶尖孔，然后再以它为基准磨削需要精加工的外圆。

2． 先粗后精，先主后次 质量要求较高的零件，应将粗精加工分开进行。这时，整个零件的加工工序应是粗加工在前，半精加工、精加工、光整加工相继在后。零件上的一些次要表面相对于主要表面有一定的位置精度要求，所以应先加工好主要表面，然后加工次要表面。精度要求较高的主要表面的粗加工，一般应安排在次要表面的粗加工前面，这样有利于及时发现毛坯的内在缺陷；精度要求较高的主要表面的精加工，应安排在加工过程的后部，精度要求最高的表面精加工，应安排在加工过程的最后，以免在加工其它表面的过程中受到损伤。次要表面的粗、精加工应插在主要表面粗加工之后、精加工之前进行，这是因为一方面在加工次要表面时要依据主要表面，另一方面在加工次要表面时又不影响主要表面的精加工。

3． 先面后孔 对于箱体、支架、矩形机匣等零件，平面所占轮廓尺寸比较大，用平面定位比较稳定可靠，因此其工艺过程总是选择平面作为定位精基准，先把平面加工出来，然后再以它们定位加工零件上的各个孔。此外，较大表面加工时，内应力重新分布、热变形等对整个工件的影响较大，故一般也应将其先加工。

4． 易废工序在前，一般钻孔工序在后

可能产生很高废品率的工序即易废工序应尽可能提前安排进行加工，以便及时发现废品。除作为定位基准的孔需要先钻以外，一般钻孔工序安排在工艺过程的后部，因为这些孔相对于主要表面有一定的位置要求，须待主要表面加工后才便于加工，此外，加工这些表面时，切削力、夹紧力小，不会影响主要表面的加工精度，故可安排在主要表面加工之后进行。

5． 工序顺序应尽量与车间机床布置相符合 考虑加工顺序时，应使工序顺序尽量符合车间内机床的布置情况，使工艺流程舒畅，减少车间内的往返运输和便于组织生产。如果车间机床是按机群布置的（即同类型机床安排在一块），为了避免零件在车间内的往返运输，应力求将相同的工序组合在一起（例如开始全部为车削工序，然后全部为铣削工序等）。

（二）热处理工序的安排

热处理的主要作用是提高材料的机械性能、改善金属的切削加工性和消除毛坯及切削过程产生的内应力。热处理工序在工艺路线中的安排是否恰当，是影响零件加工质量和材料使用性能的重要因素。热处理的方法、次数以及它们在工艺路线中的位置，应根据零件所使用的材料和热处理的要求来确定。常用的热处理有：

1． 预备热处理（退火、正火）

它们是用来改善金属组织、提高加工性能和消除毛坯制造时存在的内应力的一种热处理。退火可作为一些不重要件的最终处理，或作为某些重要件的预备处理；正火可作重要件的预备热处理，如果钢件的性能要求不太高，随后不拟再进行淬火与回火，便可以用正火来提高机械性能，用正火作为最终热处理。为了提高金属的加工性能，对含碳量较高的碳素钢（C>0.5%），一般采用退火，以降低其硬度，对含碳量低于0.5%的碳素钢，一般采用正火，以提高材料的硬度（硬度过低不但切屑不脆，易形成很长的带状切屑而缠绕，造成刀具的发热和磨损，并且使加工后零件表面粗糙度很大）；对于合金钢，由于合金元素的加入，其硬度有所提高，故在大多数情况下，中碳以上合金钢都需要退火，而不适宜正火。正火比退火经济，在可能条件下，应优先考虑以正火去代替退火。

2． 最终热处理（淬火与回火）

它是用来获得零件所需要的金属内部组织和机械性能的一种热处理。它在零件加工过程中所处的位置应根据零件所用的材料及其硬度要求等来确定。

零件材料为合金钢，且其硬度要求不高时，淬火与回火可安排在毛坯时进行。由于是合金钢，淬透性好；由于硬度不高，故不会影响切削加工。这样，既可避免加工后进行热处理的变形，又可减少车间之间的运输。例如56式14.5mm高射机枪的枪管，材料是合金钢，硬度要求不高（2690～3410N/mm²），淬火和回火安排在毛坯时进行。

零件材料为碳素钢（中碳钢），其硬度要求不高时，热处理工序一般安排在某些主要粗加工工序之后，这样做主要是为了保证工件淬透，不影响且有利于切削加工，同时还可以避免热处理变形所带来的影响。例如各种碳素钢枪管，通常是在钻孔和粗车外圆之后进行热处理。

零件材料为碳素钢（中碳钢）或合金钢，当其硬度要求较高时，热处理工序一般安排在半精加工之后、精加工之前进行，这样做既有利于切削加工，又可获得满意的淬火效果，不过在热处理之后工件会发生变形，特别是薄壁、刚性不足、结构复杂的零件更是如此。因此，一般应对热处理提出防止变形的要求，并在热处理后增设必要的校正工序（在热处理车间进行），对一些重要表面应预留精加工时包括纠正变形量在内的加工余量。

某些零件（如枪管）由于其上有不同的硬度要求，一般需要进行两次热处理，第一次整体热处理，按上述安排进行，第二次局部热处理，安排在精加工之前进行。但有的工厂进行了革新，采用一次淬火，两次回火。第一次回火是将硬度要求低的部分采用较高温度的局部回火，这时将硬度要求较高的部分露出铅炉液面，并给予适当冷却，维持其较高硬度；第二次回火则按高硬度部分的要求采用较低温度的整体回火，以达到零件上两种不同的硬度要求。

如果零件表面要求的硬度高，则需进行表面淬火。一般采用高频淬火，安排在工艺过程的末尾进行。

有的零件要进行渗碳淬火，有的零件要进行氮化。渗碳用于低碳钢和低合金钢。由于渗碳淬火变形较大，故常将渗碳工序提前在次要表面加工之前进行，然后加工次要表面再淬火，这样可以减少淬火后次要表面与主要表面之间的位置误差，且可保证次要表面不被淬硬。氮化的变形很小，需要的时间很长，因此安排在精加工之间进行。

3. 去应力热处理（回火）

对于精度要求较高的零件，在加工过程中要进行去应力回火，精度要求很高的零件，在加工过程中要安排多次去应力回火。自动武器制造中，在某些校正工序以后，某些枪管在挤线以后，要进行去应力回火，以消除内应力，防止变形。对于某些镀铬较厚的枪管，镀铬后要进行定性回火。它实际上也是一种去内应力回火。镀铬时铬层晶格中存在有氢，产生很大的内应力，为了让氢扩散出来，减少铬层的内应力，防止铬层裂纹与脱落，故在镀铬之后要进行这种回火。

（三）表面处理工序的安排

表面处理包括表面化学与电化学处理、表面机械方法的强化处理以及油漆等。表面化学与电化学处理包括氧化、磷化、钝化以及电镀等工序；强化处理包括滚压、喷丸、锤击、挤压等工序。表面处理一般安排在工艺过程的最后，强化处理须安排在热处理之后或表面化学与电化学处理之前进行，电镀工序安排在表面化学处理（氧化、磷化、钝化）之前进行。

（四）辅助工序的安排

辅助工序包括的内容很多，例如检验、钳工清理（去毛刺、打磨、倒棱等）、清洗、涂防锈油等。

检验工序是重要的辅助工序，它是保证产品质量的必要措施之一。零件加工过程中的检验工序有四类：即中间检验工序、最终（或成品）检验工序、表面质量检验工序和特种检验工序。通常以前面两种检验为最多。每个操作工人必须在操作过程中和加工完成以后进行自检。在工艺规程中还必须在下列情况下安排检验工序：

1. 由一个加工阶段转入另一个加工阶段时要进行中间检验。例如在粗加工后安排重要精基准面的检验和对后续工序有影响的重要尺寸的检验；半精加工后安排已加工的非重要表面的终检。

2. 在工作量大的和重要的工序加工以前及以后进行中间检验。

3. 工件从一个车间转到另一个车间（如热处理车间）的前后要进行中间检验。

4. 零件全部加工结束之后要进行最终检验。

上面是加工精度的检验。表面质量检验主要是指磁力探伤，通常安排在精加工之后进行。氧化、磷化、电镀后的表面质量检验，通常安排在这些工序之后立即进行。特种检验例如X射线检查、超声波探伤等多用于工件（毛坯）内部质量检查，一般安排在工艺过程的开始。超声波检验要求被检测的零件表面粗糙度为$Ra6.3\sim1.6$，若毛坯表面粗糙度太大时，则应安排在粗加工之后或半精加工之前进行。

在机械加工之后，特别是钻、铣工序之后需要去毛刺。为了确保定位精度，一定要除去定位基准面上的毛刺。除特殊规定者外，一般是不允许在零件上有不倒棱的锐边的。倒棱工序希望尽量合并在加工工序之内。

为了提高检验精度，防止损坏量具，在检验工序之前，要安排去毛刺、清洗工序；在零件加工完成之后，有的也要安排去毛刺和清洗工序，否则便会影响装配。

综上所述，把零件各加工表面按加工先后顺序，并穿插必要的热处理工序、表面处理工序和辅助工序，以工序号为序排列起来，就形成了要拟订的一条完整的加工工艺路线。

在自动武器制造中，由于大多数零件的尺寸小、形状复杂、质量小，且各表面均需加工，生产规模属于大批大量生产，所以采用了按工序分散的原则设置工序，故工序数目多，工艺路线长。整个加工一般多按三个阶段，具体是指：在加工过程的开始阶段（粗加工阶段），首先加工基准面，当基准面为一组时，便应按基准转换次序和逐步提高精度的原则把这一组基准粗、精加工出来，为后续工序提供精基准，然后对一些主要表面进行粗加工以及对可能出现大量废品的关键工序进行粗加工；在加工过程的中间阶段（半精加工阶段），对一些主要表面进行半精加工，对一些次要表面进行粗加工、精加工，热处理一般放在这个阶段之后进行；在加工过程的最后阶段（精加工阶段），即从热处理工序以后开始，往往需要修正精基准，并对零件上的一些精确表面进行精加工。

第七节　机床及工艺装备的选择

一、机床的选择

零件加工的精度和生产率在很大程度上取决于所用的机床，因此，正确地选择机床是拟订工艺规程中的一个很重要的问题。

选择机床时，主要是决定机床的类、组、型及主参数，也就是机床的类型和规格。选择机床要考虑以下几点：

1．机床类型要与生产规模相适应　机床的种类很多，有不同的类型。按机床用途的广狭可分为通用机床、专门化机床、专用机床和组合机床。各种类型的机床其生产率是不同的。选择机床类型时，既要考虑机床的生产率，又要考虑工艺过程所要求的工序集中和分散程度，还要考虑整过工艺过程的经济性，使各方面的要求合理地得到满足。

2．机床规格应与加工零件的外廓尺寸相适应　所谓规格指的是机床的主要参数。对车床就是主轴中心高及顶尖距，即床身上允许的最大工件回转直径和最大工件长度；对钻床是最大钻孔直径；对铣床是工作台工作面宽度和长度。工件的外廓尺寸或要求钻孔的直径必须在机床许可范围之内。所以工件小选用小机床，工件大选用大机床，做到合理使用设备。不能选大机床加工小零件，也不要选小机床加工大零件。只有当缺乏大设备时，为了完成加工任务，才采用“蚂蚁啃骨头”的办法，以小设备来加工大零件。

3．机床精度应与加工精度要求相适应　机床的精度过低，不能保证工件的加工精度；机床的精度过高，便会增加投资和提高加工成本。所以，两者要相适应。当零件的加工精度要求高，但又缺乏精密设备时，可将旧设备进行改装，以粗干精。例如，在旧设备上配一套好夹具，工件的加工精度由夹具保证，从面便可提高工件的加工精度。

4．机床的转速范围、进给量等级、机床功率及刚度应与加工工艺、合理的切削用量相适应　粗加工时要选功率大、刚度大、进给量也大的机床；精加工时则应选转速高、有较小进给量的机床，只有这样，才能保证生产率和加工质量。

5．选用的机床应尽量与工厂的实际情况相结合　为了充分发挥现有设备的作用，应尽量避免或减少添置新设备，以减少投资，提高经济效益。为此需要了解工厂现有设备的类型、规格、精度、设备负荷及其分布排列情况，以便所选机床与工厂的实际情况更好的结合。

二、工艺装备的选择

（一）夹具的选择

在制订工艺规程时，对所用夹具需要作一初步的考虑和选择。因为在工序图上要表示定位、夹紧以及同时加工的件数等。一般单件小批生产，首先考虑采用机床所备有的各种万能夹具和附件，为了减少生产准备时间，提高生产率，应积极推广使用组合夹具。在大批大量生产条件下，应采用高生产率的气、液压传动的专用夹具。对专用夹具应提出设计任务书，以便安排生产技术准备工作。

（二）刀具的选择

在选择刀具时应考虑工序种类、生产率、经济性、工件材料、加工精度、表面粗糙度及所用机床的性能等主要因素。选择刀具材料时要考虑生产规模、工件材料和刀具的复杂性。刀具的形状和尺寸在很大程度上影响刀具材料的选择，机床的性能可以影响刀具切削性能的发挥。一般应尽可能选用标准刀具，必要时也可采用特制刀具，如成形车刀、成形铣刀、组合刀具，非标准尺寸的钻头、铰刀等。对特制刀具应提出设计任务书。

（三）量具的选择

在选择量具时，通常要考虑被测件的精度、尺寸、表面质量和生产规模。对单件小批生产应采用通用量具，对大批大量生产，应采用各种量规和专用量具。如选用专用量具，应提

出设计任务书。量具的精度必须与工件的加工精度相适应。

第八节　加工余量与工序尺寸的确定

一、加工余量的概念

加工余量是指在加工过程中，从零件被加工表面上切除的金属层厚度。加工余量可分为加工总余量和工序加工余量。某一加工表面从毛坯到其全部工序结束所切除的金属层厚度的总和称为加工总余量。其值为毛坯尺寸与零件尺寸之差。某一表面在一个工序（或工步）中需要切除的金属层厚度称为工序加工余量，其数值为该工序（或工步）加工前后尺寸之差。加工总余量Z_{zh}与工序加工余量Z_i的关系为

$$Z_{zh}=\sum_{i=1}^{n}Z_i$$

式中，n为工序（或工步）数目。

加工总余量的大小应以毛坯经过机械加工后能恰好满足零件图上的要求为准。若余量过大，将使加工工作量增加，相应的材料、机床、刀具等各项消耗也要增加，势必使成本提高，有时还会将加工表面需保存的最耐磨的表面层切掉（例如机床床身的导轨面）；若余量过小，一方面可能去不掉表面在加工前所存在的误差和缺陷层，造成局部切不到的情况，影响加工质量，甚至还要产生废品，增加成本；另一方面在切除加工性很差的表面（如很硬的夹砂外皮）时，还会使刀具迅速磨损。

由于毛坯制造和各工序的加工尺寸都不可避免地存在误差，因而无论加工总余量还是工序加工余量都是一个变动值。所以加工余量有最小加工余量、基本加工余量和最大加工余量之分（图5-9）：

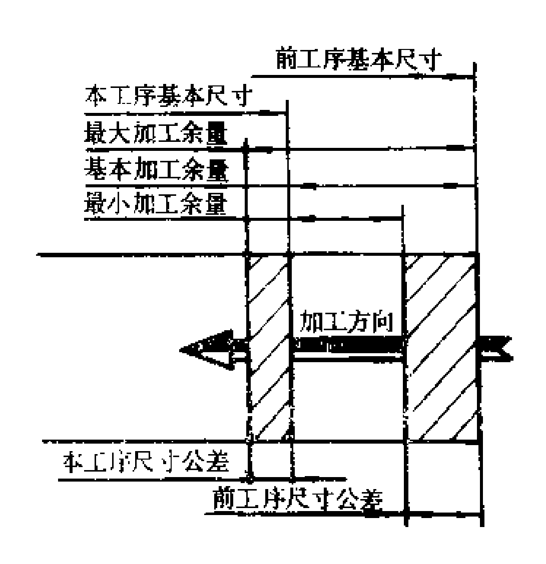


图5-9　加工余量及其公差

1．最小加工余量　所谓最小加工余量就是保证工序质量要求面需从被加工表面上切除金属层的最小厚度。其数值等于上道工序最小工序尺寸与本工序最大工序尺寸之差，或等于

基本加工余量减去上道工序的公差。

2. 基本加工余量　它是相邻两工序基本尺寸之差，亦等于本工序的最小加工余量与上道工序公差之和。

3. 最大加工余量　它是上道工序最大工序尺寸与本工序最小工序尺寸之差，或等于基本加工余量与本工序公差之和。

最大加工余量减去最小加工余量，就是加工余量的变动范围（公差）。工序加工余量的变动范围（公差）等于上道工序的公差与本工序公差之和。

加工余量还可分为单边余量和对称（双边）余量。加工旋转表面（外圆、内孔等）时，加工余量是对称的；依次加工各平面时，加工余量是单边的；同时加工相对的两个平面时，加工余量也是对称的。

零件图上所标注的公差是工艺过程最后要达到的。所以加工过程最后一道工序的公差就是零件图上所标注的公差。它是由设计人员确定的。加工过程中其它各道工序的公差，则由工艺人员来确定。工序公差确定要合理，公差过小，没有必要，还会使加工困难，增加成本；公差过大，除了会使加工余量增大，余量公差大，使加工尺寸更加分散或达不到加工要求外，还会降低定位精度，使加工精度降低。所以，工序公差是取本工序加工方法的平均经济加工精度。但必须使前道工序尺寸的公差小于本道工序所确定的加工余量。工序尺寸的公差一般规定按"入体原则"标注，即对被包容面（轴），最大加工尺寸就是基本尺寸，取上偏差为零；对包容面（孔），最小加工尺寸就是基本尺寸，取下偏差为零。采用这种标注方法，检验加工尺寸时可使用通用量具，从而避免设计和制造专用量具，并便于工人加工时控制加工尺寸。

毛坯的公差由毛坯的制造方法确定，一般在毛坯的基本尺寸上注成双向偏差。计算总余量和第一道工序的基本余量时，不考虑毛坯尺寸的全部公差，而只用"入体"方向的允许偏差，即外表面用"负"的部分，内表面用"正"的部分。

一般所说的工序加工余量都是基本余量。由工艺手册直接查出的加工余量和计算切削用量时所用的加工余量均为基本余量。但在计算第一道工序的切削用量时，应采用最大余量，因为这道工序的余量公差太大，对切削过程的影响也很大，直接影响到所选设备能否保证切削所需的功率问题，故应采用最大余量。

图5-10所示为毛坯轴和毛坯孔经过粗加工、半精加工和精加工三道工序的加工余量和加工尺寸的分布图。

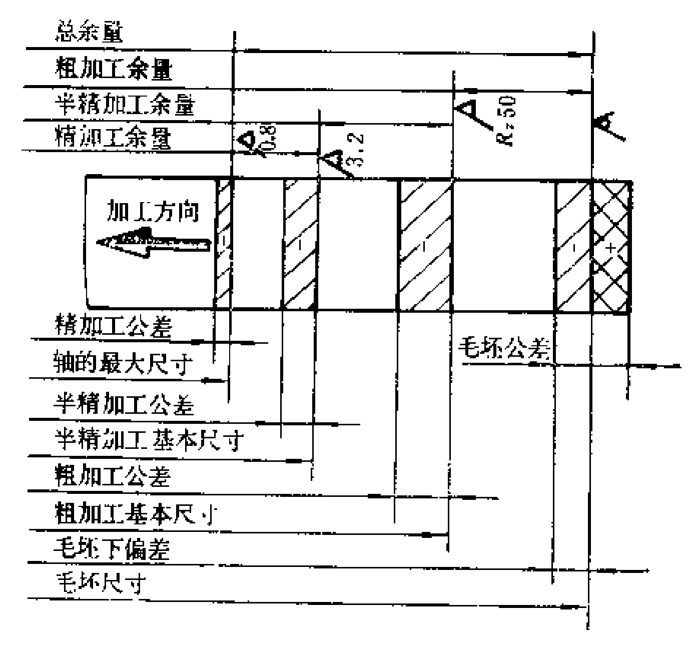
二、加工余量的确定

为了使零件在加工过程中的质量得到逐步提高，并能在最后获得零件设计时所要求的质量，各加工工序的基本加工余量不能小于某个数值。为了正确地确定各工序的基本加工余量，必须首先分析影响加工余量的因素。

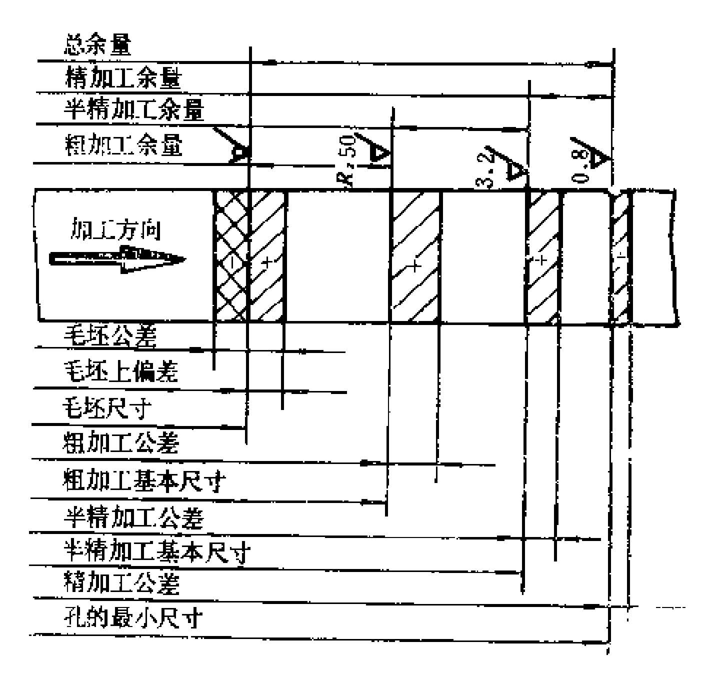
（一）影响加工余量的因素

影响加工余量的因素有：

1. 上一工序的尺寸公差T_a　上一工序加工后的表面，存在着各种形状公差（如直线度、平面度、圆度和圆柱度等）和位置公差（如平行度、垂直度、同轴度和对称度等），这些公差的大小，一般均包含在上一工序的公差T_a的范围之内，为了使加工表面不残留上一工序的这些误差，本工序的加工余量必须包括上一工序的尺寸公差T_a。



(a)



(b)

图5-10　加工余量和加工尺寸分布图

(a)轴的加工；(b)孔的加工

2. 上一工序(或毛坯)的表面质量　表面质量指的是表面微观不平度的高度R_{za}和表面缺陷层的深度T_{qa}。为了保证加工质量，对上一工序加工后的R_{za}和T_{qa}，必须在本工序中切除。表面缺陷层对铸件毛坯指的是冷硬层、气孔和夹渣等，对锻件毛坯指的是氧化皮、脱碳和表面裂纹等，对切削加工表面指的是冷硬层(变质层)。

3. 上一工序所形成的工件空间位置误差ρ_a　所谓空间位置误差指的是没有包括在尺寸公差带以内的形状公差和位置公差。例如弯曲、位移、偏心、偏斜、不平行、不垂直等。上述误差有各自的方向，如有几项误差同时存在时，ρ_a便是这几项误差向量的向量和。ρ_a这种误差必须在加工中予以纠正，因此它应包括在本工序加工余量之内。例如轴类工件在毛坯制

造、热处理以及运输、存放中，均要发生弯曲，若弯曲度为ρ_{aw}时，则加工余量至少增加$2\rho_{aw}$才能保证该轴在加工后消除弯曲。细长轴的加工余量比短轴要大，就是考虑了这一误差的影响。此外，对于枪管在钻深孔时钻头有走偏量ρ_{ap}，要纠正走偏，粗车枪管外圆时毛坯直径需增大$2\rho_{ap}$。

4．本工序加工时的安装误差ε_b　安装误差包括定位误差和夹紧误差，由于这个误差直接影响被加工表面与切削刀具的相对位置，可能造成余量不够，故加工余量中也应把它考虑进去。定位误差和夹紧误差可按《机床夹具设计》中的方法计算。由于这两个误差均是向量，故安装误差是它们的向量和。

综上所述，可以列出加工余量的计算公式如下

对双边余量　$2Z_b \geqslant T_a + 2(R_{za} + T_{qa}) + 2|\vec{\rho}_a + \vec{\varepsilon}_b|$

对单边余量　$Z_b \geqslant T_a + (R_{za} + T_{qa}) + |\vec{\rho}_a + \vec{\varepsilon}_b|$

对枪管粗车外圆余量　$2Z_b \geqslant T_a + 2(R_{za} + T_{qa}) + 2|\vec{\rho}_{aw} + \vec{\rho}_{ap} + \vec{\varepsilon}_c|$

由于ρ_a与ε_b在空间可有不同的方向，故在计算时应取向量和的绝对值。

上面式子右端各项的数值大多数可根据有关资料查得，但也有的要结合实际情况通过实验统计得到。

在余量公式中，带有注脚“a”的影响因素都是属于上一道工序（或工步）的，而带有注脚“b”的，则是属于本工序（或工步）的。

图5-11所示为利用轧制毛坯，将其安装在三爪卡盘上，车削直径ϕd_b轴时，加工余量的各影响因素的构成图。

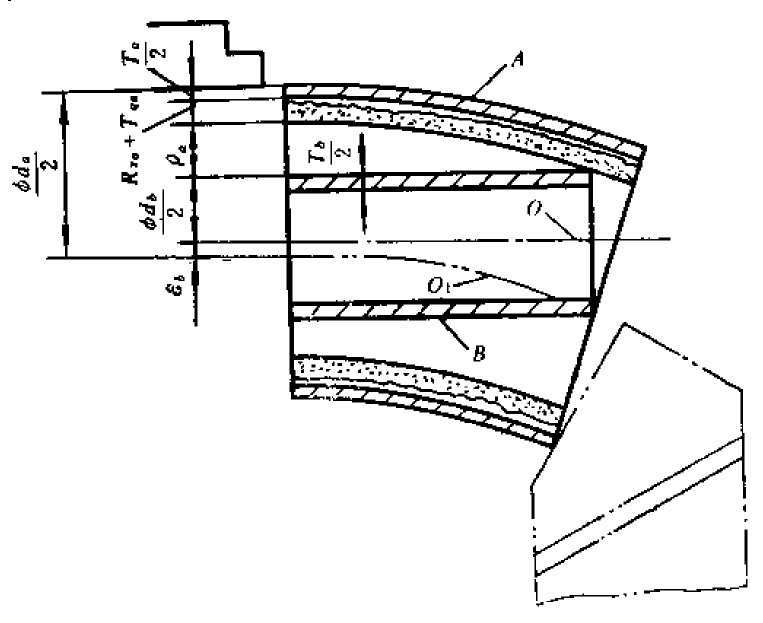


图5-11　影响加工余量的因素

A—加工前；O—旋转轴线；O_1—工件轴线；B—加工后

图中，T_a为轧制毛坯公差的“入体”部分；R_{za}为表面微观不平度的高度；T_{qa}为表面缺陷层的深度；ρ_a为空间位置误差，此处即为毛坯的挠度；ε_b为安装误差，其值为本工步工件的几何轴线O_1对其旋转轴线O的径向偏移，这种偏移是由于定位误差及卡爪位移不均等面综合产生的；ϕd_a为轧制毛坯的直径；T_b为本工序（车削）公差。

前面加工余量的计算表达式是一个通式，在具体应用时，可根据具体情况进行简化。例

如用浮动镗刀块镗孔、拉刀拉孔、铰刀铰孔等场合，由于刀具基本上是按工件孔的原来轴线进行加工的，不能纠正孔的偏斜和弯曲，并且没有安装误差，所以此时的加工余量计算公式为

$$2Z_b \geqslant T_a + 2(R_{za} + T_{4a})$$

对于超精光磨与抛光，其主要任务是减小工件表面的粗糙度，故其余量计算式为

$$2Z_b \geqslant 2R_{za}$$

用上述计算公式确定加工余量是科学的、经济的，但需要有比较全面的数据、资料，且计算过程比较复杂，因此，广泛使用受到限制，目前仅用于大批大量生产中的一些重要工序的余量确定。

（二）确定加工余量的方法

确定加工余量的方法有三种：

1. 经验估计法　由具有丰富经验的工人或技术人员，根据其实际经验以及工厂的生产情况，来估计并确定工件各表面的工序加工余量和加工总余量。此法比较简便，但要求确定者具有丰富的实践经验；为了不出废品，估计的余量一般均偏大。常用于单件和小批生产。

2. 查表修正法　把工厂生产实际和试验研究总结积累的一整套加工余量的数据列成表格，这些表格可在各种机械加工手册中查到。确定余量时，以这些表格推荐的数据为基础，并结合工厂实际情况进行修正即可使用。此法比较简单，确定的余量可靠，所以工厂用得较多。

3. 分析计算法　利用前面讲述的余量计算公式，通过计算来确定余量。此法最为经济合理，既能保证加工质量，又能节约金属，特别是大批大量生产的重要工序的加工中值得推广。

三、工序尺寸及其公差的确定

计算工序尺寸和标注其公差是制订工艺规程的主要工作之一。工序尺寸是指零件在加工过程中各个工序所应保证的尺寸。工序尺寸与零件图的尺寸只相差一个加工余量。当加工余量确定之后，便可根据零件表面在工艺过程中所经过的加工工序及零件图的尺寸，采用由最后一道工序逐步向前推算的方法，确定每道工序的工序尺寸。而工序尺寸的公差，除最后一道工序应为零件图的公差以外，其它工序均可按加工方法的平均经济精度确定。

工序尺寸及其公差的确定与工序加工余量的大小，工序尺寸的标注以及定位基准的选择和变换有密切关系。在计算工序尺寸时，常常会遇到以下三种情况的工序尺寸：

1. 当定位基准和测量基准与设计基准不重合时进行尺寸换算所形成的工序尺寸；

2. 零件图上主要设计基准往往是多个尺寸标注的起点，当此基准面要求很高时，须放在最后加工。致使在前面工序中完成的表面，加工时无法以它作为原始基准，因而便造成基准不重合。在最后加工主要设计基准面时，只能直接保证一个设计尺寸，其它设计尺寸均需间接保证，这就需要进行工序尺寸换算，即一次加工后同时保证多个设计尺寸的计算；

3. 某一表面需要进行多次加工所形成的工序尺寸。它是指加工该表面的各道工序定位基准相同，并与设计基准重合，只需要考虑各工序的加工余量。

前二点已在尺寸链课程中讲述，此处不再重复。现仅讲第三点。它的计算比较简单，根据零件图上的尺寸和所确定的工序余量采用“倒推法”即可求出各工序的尺寸及毛坯尺寸。

例如：某法兰盘零件上有个孔，孔径$\phi60^{+0.03}_{0}$mm，表面粗糙度Ra值为0.8μm，需淬硬。工艺上考虑需经过粗镗、半精镗和磨削加工。

工序尺寸及其公差的具体确定如下：

（1） 确定工序余量（用查表法）

磨削余量　　0.4mm；

半精镗余量　　1.6mm；

粗镗余量　　7 mm；

总余量　　9 mm。

（2） 计算各工序尺寸

磨削后　　达到零件图规定尺寸$\phi60$mm；

半精镗后　　$\phi60-0.4=\phi59.6$mm；

粗镗后　　$\phi59.6-1.6=\phi58$mm；

毛坯孔径　　$\phi58-7=\phi51$mm 。

（3） 确定各工序尺寸的公差

按照加工方法能达到的经济精度给出各工序尺寸的公差。

磨削：　　按零件图规定$+0.03$mm，0.8▽；

半精镗：　　取IT9级精度，查表得0.074mm，3.2▽；

粗镗：　　取IT12级精度，查表得0.3mm，R50▽；

毛坯公差：取$\pm^{2}_{1}$mm。

工序尺寸的公差取"入体"方向。各工序的工序尺寸及公差如图5-12所示。

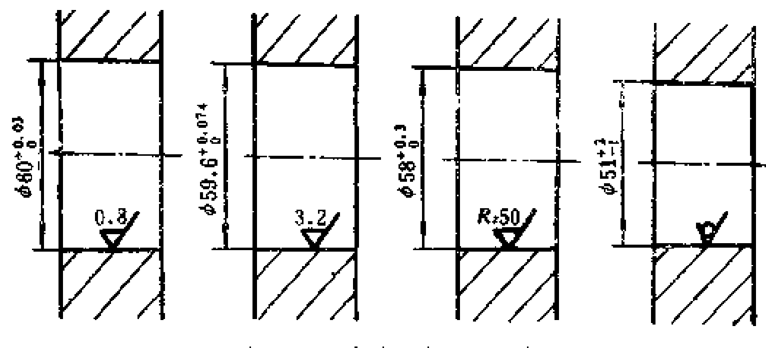


图5-12　内孔工序尺寸计算

第九节　切削用量的选择

正确地选择切削用量，对提高切削效率，保证必要的刀具耐用度和经济性，保证加工质量，具有重要的作用。

一、粗加工时切削用量的选择

粗加工时加工精度与表面粗糙度要求不高，毛坯余量大。因此，在选择切削用量时，要尽可能地保证在单位时间内有较高的金属切除量（金属切除率）和必要的刀具耐用度，以提高生产效率和降低加工成本。

金属切除率可用下式计算

$$Z_w \approx v f a_p \times 1000 \text{mm}^3/\text{s}$$

式中　Z_w——金属切除率（单位时间内切除金属的体积），mm^3/s；

v——切削速度，m/s；

f——进给量，mm/r；

a_p——切削深度，mm。

提高切削速度、增大进给量和切削深度都能提高金属切除率。但是切削用量（ v、 f、a_p ）与刀具耐用度t有下列关系

$$t=\frac{C_t}{v^n f^p a_p^q}$$

式中 C_t——耐用度系数，它与刀具材料、刀具参数、工件材料和切削条件有关；

n、p、q——指数，且$q<p<n$。

从上式可知：影响刀具耐用度最大的是切削速度v，其次是进给量f，影响最小的是切削深度a_p。所以粗加工切削用量的选择原则是：首先考虑选择一个尽可能大的切削深度a_p，其次选择一个较大的进给量f，最后确定一个合适的切削速度v。

选用较大的a_p和f以后，刀具耐用度t显然也会下降，但要比v对t的影响小得多，只要稍微降低一点v便可以使t回升到规定的合理数值。因此，能使v、f、a_p的乘积较大，从而保证了较高的金属切除率。此外，增大a_p可使进刀次数减少，增大f又有利于断屑。因此，根据以上原则选择粗加工切削用量，对于提高生产效率，减少刀具损耗，降低加工成本是比较有利的。

1. 切削深度a_p的选择

粗加工时a_p应根据工件的加工余量和由机床、夹具、刀具、工件所组成的工艺系统的刚度来确定。在保留半精加工、精加工必要余量的前提下，应当尽量将粗加工余量一次切掉。只有当总加工余量太大，一次切不完时，才考虑分几次走刀，但也应按先多后少的不等余量的方法加工（即第一次走刀的吃刀深度应尽量取大些）。

2. 进给量f的选择

粗加工时限制f提高的因素主要是切削力。因此，f应根据工艺系统的刚度和强度来确定。选择f时应考虑到机床进给机构的强度、刀杆尺寸、刀片厚度、工件的直径和长度等。在工艺系统刚度和强度好的情况下，可选用大一些的f；较差时应适当减小f。各种加工条件下的f值，可参照有关表格选取。

3. 切削速度v的选择

粗加工时，切削速度v主要受刀具耐用度t和机床功率的限制。合理的切削速度一般不需要经过精确计算，而是根据生产实际经验和有关资料确定。v、a_p、f三者决定了切削功率，在确定v时必须考虑到机床的许用功率。通过核算，如超过了机床的许用功率，则应适当降低v。一般情况下，v的大致范围如下：

（1）硬质合金车刀车削中碳钢（正火、退火状态），平均切削速度为$v=100$m/min；车削灰铸铁（硬度≤1900N/mm²），平均切削速度为$v=70$m/min。在这种v的条件下，刀具耐用度$t=60\sim90$min。

（2）车削合金钢时，v要比车削中碳钢低20～30%。

（3）车削调质状态的钢料时，比车削同类正火、退火状态的钢料要降低切削速度20—30%。车削淬火钢时，切削速度应降低50～60%。

（4）车削有色金属的v可比车削中碳钢提高100～200%。

（5）高速钢刀具的v大体为硬质合金刀具的1/4～1/5。

二、精加工时切削用量的选择

精加工时加工精度和表面粗糙度要求较高，要求加工余量小且较均匀。因此，在选择精加工的切削用量时应首先保证获得所要求的加工精度和表面粗糙度，同时还要得到必要的刀具耐用度和生产效率。

1．a_p的选择

精加工时a_p应根据粗加工留下的余量确定。通常希望精加工余量不要留得太大，否则，a_p较大时，切削力增加较显著，影响加工质量。

2．f的选择

精加工时限制f提高的主要因素是表面粗糙度。f增大时，虽有利于断屑，但残留面积高度增大，切削力上升，表面质量下降。精加工时的f值，可参照切削用量手册中有关数据选用。

3．v的选择

v提高时，切削变形减小，切削力有所下降，而且不会产生积屑瘤和鳞刺。一般要选用切削性能好的刀具材料和合理的几何参数，以尽可能提高v。只有当v受到工艺条件限制而不能提高时，才选用低速，以避开积屑瘤产生的速度范围。

由上可见，精加工时应选用较小的a_p和f，并在保证合理刀具耐用度的前提下，选取尽可能高的v，以保证加工精度和表面质量，同时满足生产率的要求。

以上所述是选择切削用量的一般原则。在实践中，切削用量还要根据工件形状、工序种类和其它生产条件进行调整，具体来说，有以下几个方面：

（1）断续切削时为了减少冲击，应降低切削用量，尤其是v。

（2）内孔车削的切削用量应比外圆车削小些，尤其是切削深度和走刀量。因为镗刀杆刚性差，a_p或f加大后易变形和产生振动。

（3）车端面时v可比车外圆时适当提高，使平均切削速度接近于车外圆的数值。

（4）在组合机床或自动机床上加工时，若要求刀具有较高的耐用度，应降低v。一般情况下，组合机床的v比通用机床约平均降低20～25%左右。

（5）粗加工时a_p和f均较大，受到机床功率的限制，v应适当降低。精加工时a_p和f均较小，为了减小工件表面的粗糙度，可提高v。

（6）加工大件时，因为工件刚性较好，可采用较大的a_p和f，但v不宜过高，因为v高了，工件旋转时的离心力太大，不够安全，另外，也希望刀具耐用度高一些，以免中途换刀。

在单件和小批生产中，为了简化工艺文件，常不具体规定切削用量，但要求安排较高级别的工人进行加工，以便能随时根据具体情况选择合理的切削用量。

在大批大量生产中，对组合机床和自动机床，对多刀加工工序以及精度要求较高、粗糙度要求较小的工序，应科学地、严格地选择切削用量，填入工艺文件，切实执行，以便充分发挥这些高生产率设备的潜力和高精度机床的作用。

第十节　时间定额的确定

时间定额是在一定的技术和生产组织条件下制定出来的完成单件产品或单个工序所需的时间。它是安排生产计划、计算产品成本和企业经济核算的基本依据之一，也是新建或扩建

工厂时决定设备和人员数量的重要依据。时间定额在制订工艺规程时必须正确地确定，应该具有平均先进水平，过高或过低的定额都不利于促进生产。

完成零件加工的一个工序的时间定额，称为单件时间定额。单件时间定额可按下式计算

$$T_{dj}=T_{jb}+T_{fz}+T_{jf}+T_{zf}+T_{xz} \quad \text{min} \tag{5-3}$$

式中 T_{dj}——单件时间；

T_{jb}——基本时间；

T_{fz}——辅助时间；

T_{jf}——工作地点技术服务时间；

T_{zf}——工作地点组织服务时间；

T_{xz}——休息及自然需要时间。

基本时间与辅助时间之和称为工序时间，以T_{gx}表示，即

$$T_{gx}=T_{jb}+T_{fz}$$

基本时间T_{jb} 亦称机动时间，它是直接改变生产对象（零件或单件产品）的形状、尺寸、质量或各个零件相互位置和相互关系等所耗费的时间。对切削加工来说，则是切除金属层所耗费的时间（包括刀具的切入和切出时间），一般可用计算法确定。

例如，车削外圆时（图5-13），其基本时间为

$$T_{jb}=\frac{L}{fn}i=\frac{l+l_1+l_2+l_3}{fn}i=\frac{\pi DL}{1000vf}\times\frac{Z}{a_p} \quad \text{min} \tag{5-4}$$

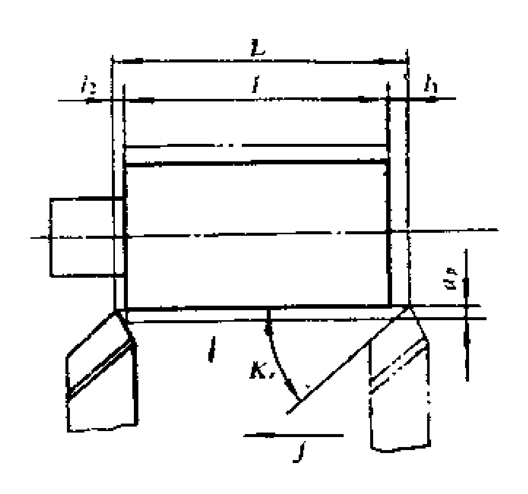


图5-13 车削基本时间的计算

式中 L——刀具行程长度，mm；

f——进给量，mm/r；

n——主轴转速，r/min；

i——进给次数；

l——加工长度，mm；

l_1——刀具的切入长度，$l_1=a_p/\mathrm{tg}K_r+(2\sim3)$ mm；

l_2——刀具的切出长度，取（3～5）mm；

l_3——试切附加长度（其值可查表），mm；

D——切削直径，mm；

v——切削速度，m/min；

Z——单面加工余量，mm；

a_p——切削深度，mm。

辅助时间T_{fz}　在每个工序中为了保证完成基本工艺工作而需要做的辅助动作所耗费的时间，其中包括：装夹工件、卸下工件、开动或停止机床、改变切削用量、试切和度量工件尺寸、进刀或退刀等辅助动作所耗费的时间。可从时间定额表中查得。

工作地点技术服务时间T_{jf}　它包括清除切屑、调整机床、更换磨钝的刀具、修整砂轮以及在没有集中磨刀的情况下所需的磨刀时间等。这一时间的多少与基本时间有关，为了计算方便起见，常用它对工序时间的比值百分数（$\alpha\%$）来表示，$\alpha\%$可从定额表中查出，一般为（1～7）%。

工作地点组织服务时间T_{zf}　它包括工作班开始时分置工具、文件等和工作班结束时收拾工具、文件等以及清理、润滑和擦拭机床、交接班等所耗费的时间。可用其对工序时间的比值百分数（$\beta\%$）表示，$\beta\%$可从定额表中查出，一般为（1～1.7）%。

休息及自然需要时间T_{xz}　休息时间仅在体力劳动繁重和易疲倦的工作中才列入定额。例如枪厂靶场打精度的射手、枪管阴影校直工、枪弹外观检查工等由于视力容易疲劳，需要规定休息时间。对于机床工作通常只考虑自然需要时间（如喝开水、上厕所等），其值约占工序时间的2%，以$\gamma\%$表示。

综上所述，单件时间定额公式可写为

$$T_{dj}=T_{jb}+T_{fz}+\left(T_{jb}+T_{fz}\right)\frac{\alpha}{100}+\left(T_{jb}+T_{fz}\right)\frac{\beta}{100}+\left(T_{jb}+T_{fz}\right)\frac{\gamma}{100}$$

$$=\left(T_{jb}+T_{fz}\right)\left(1+\frac{\alpha+\beta+\gamma}{100}\right)=T_{gx}\left(1+\frac{\alpha+\beta+\gamma}{100}\right) \tag{5-5}$$

（5-5）式即为计算单件时间定额的基本公式。

在成批生产中，尚需计入准备结束时间T_{zj}。它是工人在加工一批工件的开始或结束时所需要做的一些工作时间消耗。如在工作开始时熟悉工件和图纸、听取指示、领取毛坯材料、工艺文件、工具及夹具、调整机床（安装夹具、刀具和选择切削用量等）的时间消耗；一批工件加工完毕后交出工件和其它工作的时间消耗。T_{zj}的多少不随批量而变，即每批工件所消耗的总时间相等。故批量越大，则分摊到每个工件上的时间就越少。所以，在成批生产中的单件时间定额为

$$T_{dj\cdot p}=\left(T_{jb}+T_{fz}\right)\left(1+\frac{\alpha+\beta+\gamma}{100}\right)+\frac{T_{zj}}{n}$$

$$=T_{gx}\left(1+\frac{\alpha+\beta+\gamma}{100}\right)+\frac{T_{zj}}{n} \tag{5-6}$$

式中　n——一批中零件的数量；

T_{zj}——准备结束时间，可从定额表中查出。

在大量生产中，分摊到每个零件的准备结束时间极小，可以忽略不计。

第十一节　工艺方案的技术经济分析

在设计某一零件的工艺规程时，一般可以拟订出几种工艺方案。它们都能达到零件图上规定的各种技术要求，但其生产成本却不相同。为了选出最优方案，就需要对所拟订的几种工艺方案进行技术经济分析。通过分析比较，选择出最经济有利的也就是能保证生产成本最低的最佳方案。

对工艺方案进行技术经济分析时，通常有两种情况：其一，对一般零件，可以直接通过各种技术经济指标，如每台机床的年产量（吨/台、件/台）、每个生产工人的年产量（吨/人、件/人）、单位生产面积的年产量（吨/平方米、件/平方米）、材料利用率、设备利用率、工艺装备系数等，并结合实际生产经验，对不同工艺方案进行技术经济论证，优选出在给定生产条件下，既经济又合理的方案；其二，对生产规模较大的主要零件，在进行工艺方案的技术经济分析时，通常应通过对不同工艺方案的生产成本或投资额进行直接比较，从中优选出生产成本最低或投资回收期短的工艺方案。

生产成本是制造一个零件或一台产品时所必需的一切费用的总和。由于生产成本中，70～75%的费用与工艺过程有关，所以在比较工艺过程（方案）的经济性时，必须分析与工艺过程有关的生产费用，即工艺成本。

一、工艺成本

工艺成本包括两大部分：

1. 可变费用　它是与年产量有关并与之成正比的费用，以V表示，它包括：毛坯材料和制造费用、机床工人的工资、机床电费、通用机床的折旧费、通用机床的维修费、刀具费、通用夹具费。

2. 不变费用　它是与年产量大小无直接关系的费用。当年产量在一定范围内变化时，全年的费用基本上保持不变，这类费用以S表示。它包括：调整费用、专用机床折旧费、专用机床修理费、专用夹具费。

以上各种费用的计算公式，可参阅《机械制造工艺设计手册》第八篇。

一批零件的全年工艺成本为

$$E=VN+S \qquad (5\text{-}7)$$

式中　E——全年生产N个零件的工艺成本（元/年）；

V——可变费用（元/件）；

S——不变费用（元/件）；

N——年产量（件）。

单件工艺成本E_{dj}为

$$E_{dj}=V+S/N \quad （元/件） \qquad (5\text{-}8)$$

全年工艺成本的图解为一直线，如图5-14所示。它说明全年工艺成本的变化（ΔE）与年产量的变化（ΔN）成正比。

单件工艺成本与年产量是双曲线关系，如图5-15所示。从图中可以看出，当产量增加时，曲线的变化逐渐平缓。在曲线A段，产量变化很小（ΔN），而单件工艺成本变化却很大（ΔE_{dj}），这种情况相当于单件小批生产。在曲线C段，表示大批大量生产的情况，即使

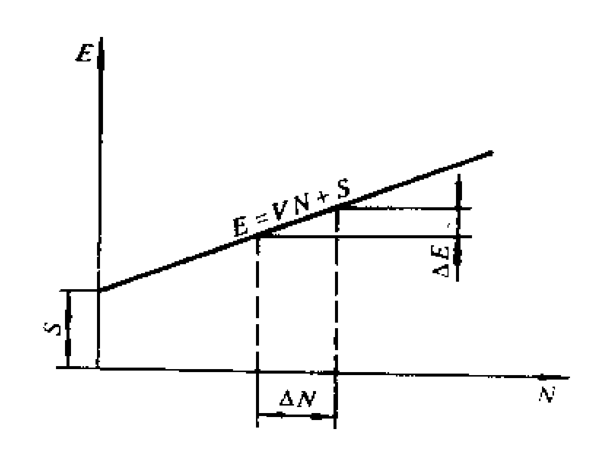


图5-14　全年工艺成本与年产量的关系

产量增加很大，对单件工艺成本的影响也很小。B段相当于中批生产的情况。

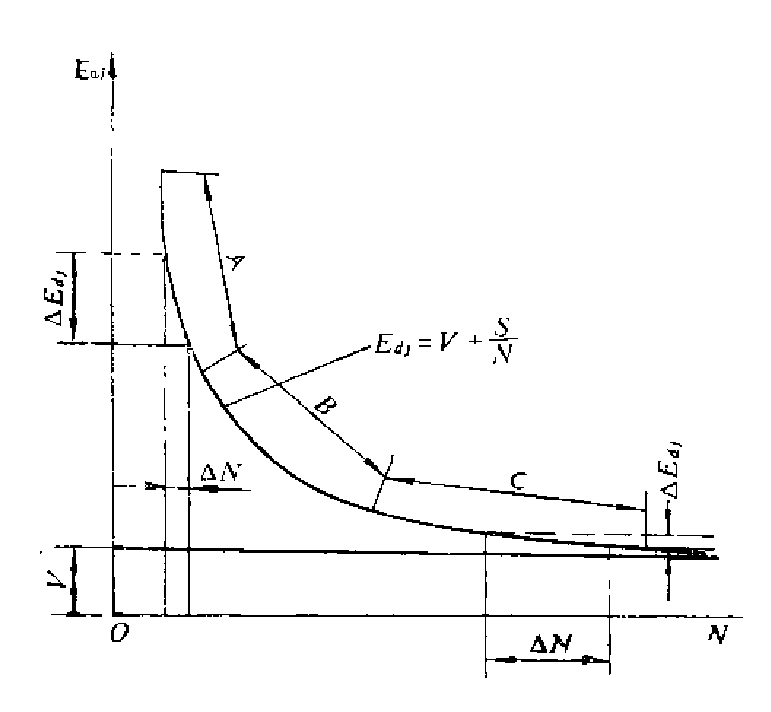


图5-15　单件工艺成本与年产量的关系

二、工艺方案的比较方法

对工艺方案进行技术经济分析时，常用工艺成本或投资回收期作为评价工艺方案技术经济效果的指标。具体分析时，可用数学分析法或图解法。下面分两种不同情况，说明分析比较其经济性的方法。

1．基本投资或使用设备相同的情况

有几种工艺方案进行比较时，当它们的基本投资相近，或都在采用现有设备的条件下，工艺成本即可作为衡量各方案经济性的依据。

实际上，一般均以零件的全年工艺成本进行比较，因为它与年产量的关系是一条直线，使用较方便。

例如，有两种不同的工艺方案，全年工艺成本分别为

$$E_1 = NV_1 + S_1 \qquad E_2 = NV_2 + S_2$$

当产量一定时，先分别计算两种方案的全年工艺成本，然后比较，选其小者。当产量变化时，根据上述公式用图解法进行比较，如图5-16所示。

由图5-16知，当计划产量$N < N_{cr}$时，宜采用第二方案；当$N > N_{cr}$时，宜采用第一方案。N_{cr}称为临界产量，其值由计算确定。由图看出，两条直线交点（当$E_1 = E_2$时）的横坐标便是N_{cr}值，即

$$N_{cr}V_1 + S_1 = N_{cr}V_2 + S_2$$

所以

$$N_{cr} = (S_2 - S_1) / (V_1 - V_2) \tag{5-9}$$

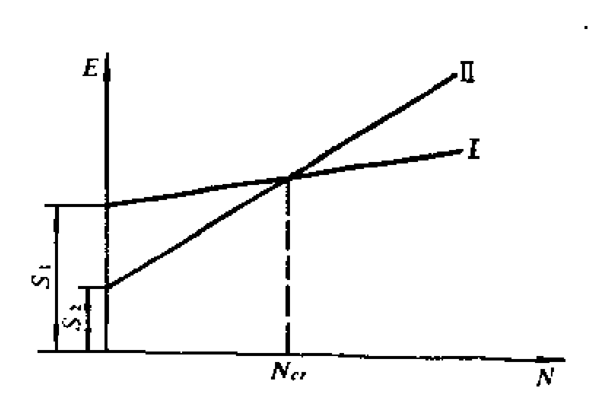


图5-16 两种工艺方案的工艺成本比较

进行经济分析的目的是求得最有利的工艺方案或加工方法，并非为了准确的计算零件成本，故几种方案的相同项目可以忽略不计，只需对各方案的不同点进行比较。

2． 基本投资差额较大的情况

当比较两个工艺方案时，其一的基本投资较大，例如第一方案采用了高生产率的价格较贵的机床及工艺装备，所以基本投资（K_1）较大，但工艺成本（E_1）较低；第二方案采用了生产率较低但价格较便宜的机床及工艺装备，所以基本投资（K_2）小，但工艺成本（E_2）较高。前者工艺成本的降低是由于增加基本投资而得到的，这个收益有多大？需要有一个评定指标——“回收期”来衡量，即用几年的时间把投资收回。

回收期限可用下式表示

$$\tau = \frac{K_1 - K_2}{E_2 - E_1} = \frac{\Delta K}{\Delta E} \tag{5-10}$$

式中 τ——回收期限（年）；

ΔK——基本投资差额（元）；

ΔE——全年生产费用节约额（元/年）。

回收期限愈短，则经济效果愈好。一般计算的回收期限τ必须满足以下要求：

（1）回收期限应小于所采用的设备或工艺装备的使用年限。

（2）回收期限应小于该产品由于结构性能及国家计划安排等因素所决定的稳定生产的年限。

（3）回收期限应小于国家所规定的标准回收期限。

第十二节　提高机械加工劳动生产率的基本途径

机械加工劳动生产率是指工人在单位劳动时间内（h，min）加工出来的合格产品的数量，或者指工人加工单件合格产品所需要的时间。单位劳动时间内加工出来的合格产品数量愈多，或者制出单件合格产品的劳动时间愈少，则劳动生产率愈高。

提高劳动生产率不单纯是一个工艺技术问题，而且与产品设计、企业管理、生产组织、工资制度、政治思想工作等有关。下面仅对在产品设计、工艺技术方面的一些提高劳动生产率的措施进行研究。

一、改进产品的结构设计

1. 减少零件的数量与减小零件的质量　在满足产品性能要求的前提下，尽量减少零件的数量与减小零件的质量，这样，既可减少加工劳动量，又可节约原材料。

2. 实行产品品种系列化、部件通用化和零件标准化　这样，可以加大零、部件的生产批量，为采用先进工艺、高效率设备和先进的生产组织方法提供有利条件，从而便可显著地提高劳动生产率。

3. 改善零件和部件的结构工艺性　在满足零件使用性能的前提下，尽量使零、部件结构简单而且具有良好的工艺性，使之既省材料，又便于加工和装配。

二、缩短单件时间定额

缩短单件时间定额中的每一个组成部分均能提高生产率。为了收到较好的效果，在缩短单件时间定额时，应首先集中精力去缩减占工时定额比重较大的那一部分时间。在单件小批生产中，应注意减少辅助时间和准备结束时间；在大批大量生产中，应注意减少基本时间。

1. 缩短基本时间T_j，

具体办法有：

（1） 提高切削用量　由（5-4）式可知，提高v、f、a_p均可以减少基本时间。

（2） 减少切削行程长度　由（5-4）式可知，减少切削长度（包括l_1和l_2），可以缩短基本时间。工件长度不能缩短，但刀具行程长度是可以缩短的。例如用一把车刀车外圆，刀具行程长度为L，如改用多刀加工，用三把车刀同时车外圆，刀具行程就只有$L/3$了（图5-17）。

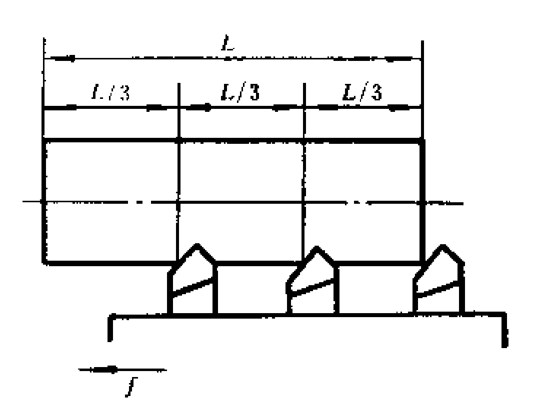


图5-17　减少切削行程长度L的方法

（3）合并工步　用几把刀具对一个零件的几个表面或用一把复合刀具对同一个表面同

时进行加工，由原来需要的若干个工步集中为一个复合工步。由于工步的基本时间全部或部分相重合，故可减少工序的基本时间，同时还可减少操作机床的辅助时间。

（4） 多件加工（图5-18） 它包括三种方式：

（i）顺序多件加工如图5-18（a） 工件2按走刀方向一个接一个安装，从而减少了刀具切入和切出时间，使分摊到每个工件上的基本时间和辅助时间减少。这种方法多见于滚齿、插齿、龙门刨、平磨和各种铣床的加工中。

（ii）平行多件加工如图5-18（b） 它是将 n个平行排列的工件2在一次走刀中同时进行加工，所需的基本时间和加工一个工件的基本时间相同，所以分摊到每个工件上的基本时间就减少到原来的$1/n$。这种加工多用于铣床、龙刨、平磨的加工中。

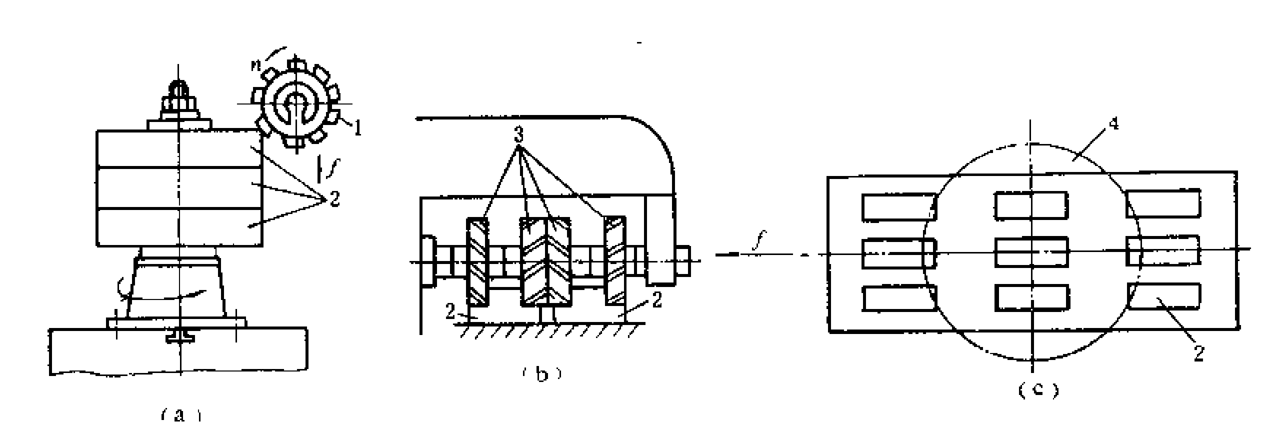


图5-18 多件加工

（a）顺序多件加工；（b）平行多件加工；（c）平行顺序加工

1—滚刀；2—工件；3—铣刀；4—砂轮

（iii）平行顺序加工如图5-18（c） 它是以上两种方法的综合，适用于工件较小、批量较大的情况，多见于立轴平磨和铣削加工。

2． 缩短辅助时间T_{fz}

随着基本时间的减少，辅助时间在单件时间中所占比重就越来越高，此时提高切削用量对提高生产率就不产生显著的效果。因此必须从缩短辅助时间着手。缩减辅助时间的措施可以归纳为两个方面，即尽量使辅助动作机械化和自动化而直接减少辅助时间以及使辅助时间与基本时间重合。

（1）直接减少辅助时间

（i）采用先进夹具 在大批大量生产中，采用高效率的气动、液压快速夹具，既可减轻工人的劳动强度，又可以减少工件装夹的时间；在单件、小批生产中，可采用组合夹具，如果采用成组加工工艺，则可采用成组夹具或通用可调夹具，它们的经济性与效率均比较好。

（ii）采用主动检测法以减少加工过程中的测量时间 这种检测法所用的装置能在加工过程中测量工件加工表面的实际尺寸，并能根据测量结果控制机床进行自动调整。目前在磨床上应用较普遍。

（iii）在各类机床上配备数字显示装置 这种装置是以光栅、感应同步器等为检测元件，它能把工件在加工过程中的尺寸变化情形连续显示出来，并能直观地反映出刀具的位移

量，节省了停机测量的辅助时间。

（ⅳ）采用快速换刀夹头缩短换刀时间。

（2）间接缩短辅助时间

间接缩短辅助时间，就是使辅助时间与基本时间重合，以减少辅助时间。

例如采用多工位连续加工（图5-19），工件的装卸时间完全与基本时间重合。又如采用转位夹具或转位工作台以及几根心轴（夹具）等，可在加工时间内对另一工件进行装卸。这样可使辅助时间中的装卸工件时间与基本时间重合。

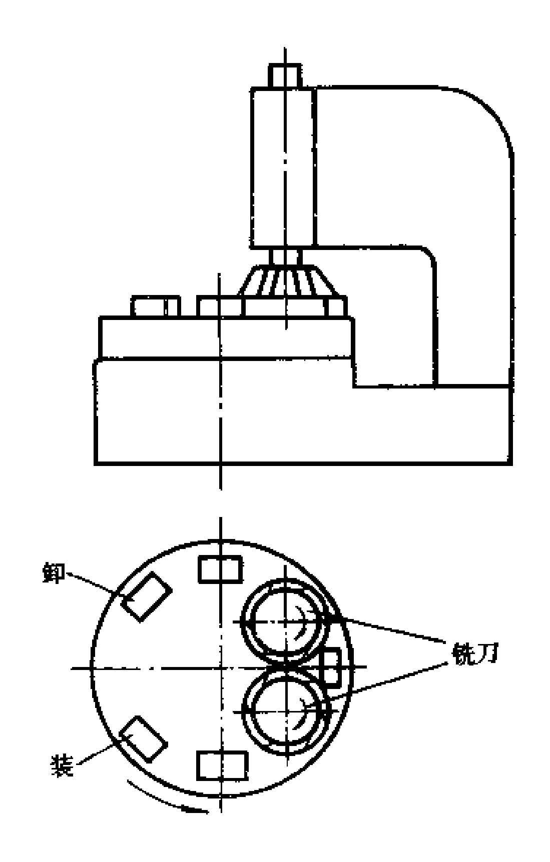


图5-19 连续铣削加工

3. 缩减工作地点服务时间

缩减工作地点服务时间的主要方向是：缩减刀具小调整和每次更换刀具的时间，提高刀具或砂轮的耐用度。目的是使在一次刃磨和修整中可以加工更多的工件。

采用各种快速换刀夹头，自动换刀装置，刀具微调装置，专用对刀样板或对刀块等，减少刀具的调整、装卸、定位和夹紧等工作所需的时间。

采用高耐磨性的不重磨硬质合金刀片，可以大大地缩短刀片的装卸、对刀及刃磨时间。

4. 缩减准备结束时间

在成批生产中，由于批量小、品种多，准备结束时间在单件时间中占有较大的比重，影响生产率的提高。为了缩减准备结束时间，就要设法缩减安装刀具、调整机床等时间。其具体办法是：使夹具和刀具调整通用化；采用刀具微调结构和对刀辅助工具；减少夹具在机床上的安装找正时间；采用准备结束时间极少的先进加工设备（如液压仿形刀架、插销板式程序控制机床和数控机床）。

三、采用先进的工艺方法

采用先进工艺或新工艺常可成倍地、甚至十几倍地提高生产率。例如：

1．采用特种加工（如电火花加工、线切割、电解加工，……）加工特硬、特脆、特韧材料及复杂型面，能大大地提高生产率。

2．在毛坯制造中采用冷挤压、热挤压、粉末冶金、失蜡铸造、压力铸造、精锻和爆炸成型等新工艺，能大大地提高毛坯精度，从根本上减少大部分机械加工劳动量，节约原材料，经济效果十分显著。

3．采用少、无切削工艺代替切削加工方法。例如用冷挤压齿轮代替剃齿，既能保证质量，又能使生产率提高4倍。

4．改进加工方法。例如在大批大量生产中采用拉削、滚压代替铣、铰和磨削；在成批生产中采用精刨、精磨或金刚镗代替刮研，均可大大地提高生产率。

四、进行高效及自动化加工

在大批大量生产中，由于固定生产某种产品，零件的数量多，生产稳定，故多采用自动化程度较高的多工位组合机床或组合机床自动线。零件加工的整个工作循环都是自动进行的。操作工人的工作只是装上毛坯和卸下成品，以及监视组合机床或自动线是否正常工作。这种生产方式的生产效率很高。

在机械加工行业中，属于大批大量生产的产品是少数，以品种而论不超过20%。而属于中小批生产的产品是大多数。根据统计，在中小批生产的产品中，主要零件占其总零件数的10%，而其制造成本要占总制造成本的50%；中型零件占总零件数的40%，它们的制造成本占总的制造成本的30%；小型零件占总零件的50%，而其制造成本却只占总成本的20%，如图5-20所示。主要零件制造成本较高，是由于它们消耗较多的材料和机械加工劳动量。

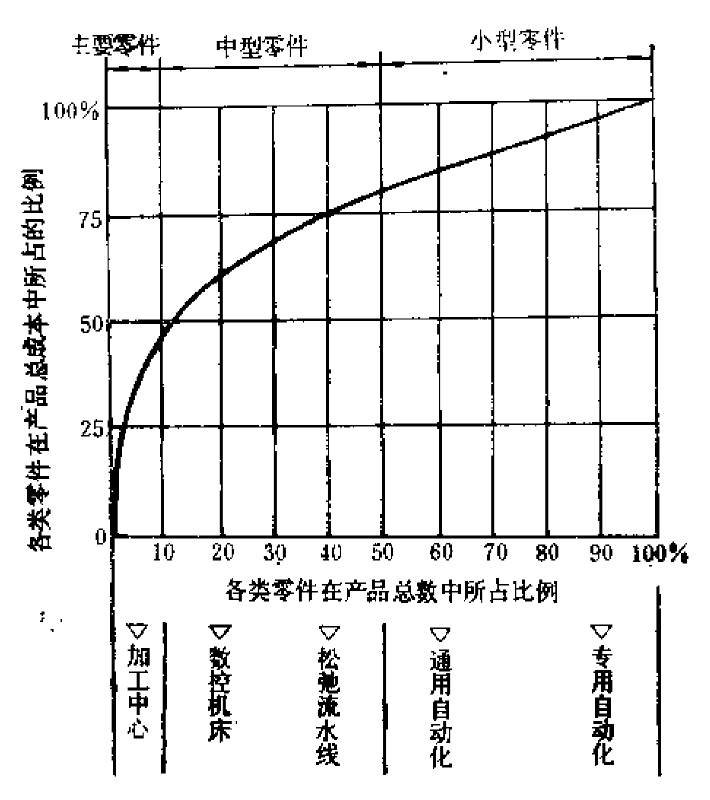


图5-20 零件类型与制造成本的关系

根据对中小批产品生产的研究，主要零件以用加工中心最为经济；中型零件可采用数控机床、流水线或非强制节拍的自动线最为经济；而小型零件则视情况不同，可采用各种专用或通用自动机以及简易数控机床。在中小批生产中实行成组加工，可以从根本上改造中小批生产的技术准备工作和生产组织方式，可以采用高效自动化设备，极大地提高生产率。

1．自动化机床

批量很大的小型零件常采用各种专用的和通用的自动机床加工，例如多轴自动车床，多刀半自动车床等，实现单机加工自动化，生产率高，工作可靠。但其工作循环多半采用凸轮控制，更换一个工件就要更换一套凸轮，因此只适用于大批大量生产。为适应中小批生产，出现了由液压和电气操纵的自动机，例如各种类型的半自动和全自动磨床，自动化插齿机，液压仿形车床。这类自动机更换加工对象时，调整容易。对于插销板式程序控制以及其它类型的简单程序控制机床，由于它们可以很方便地调整出所需的自动控制程序，因此它们还可以推广到极小批量的生产中使用。

2．数控机床

数字程序控制机床简称数控机床，是用数控装置进行程序控制的高效自动化机床。它是综合应用计算技术、自动控制、精密测量和机床结构等技术领域中的新成就而发展起来的一种机床。

数控机床的工作原理如图5-21所示。在数控机床上加工零件时，首先根据零件图纸规定

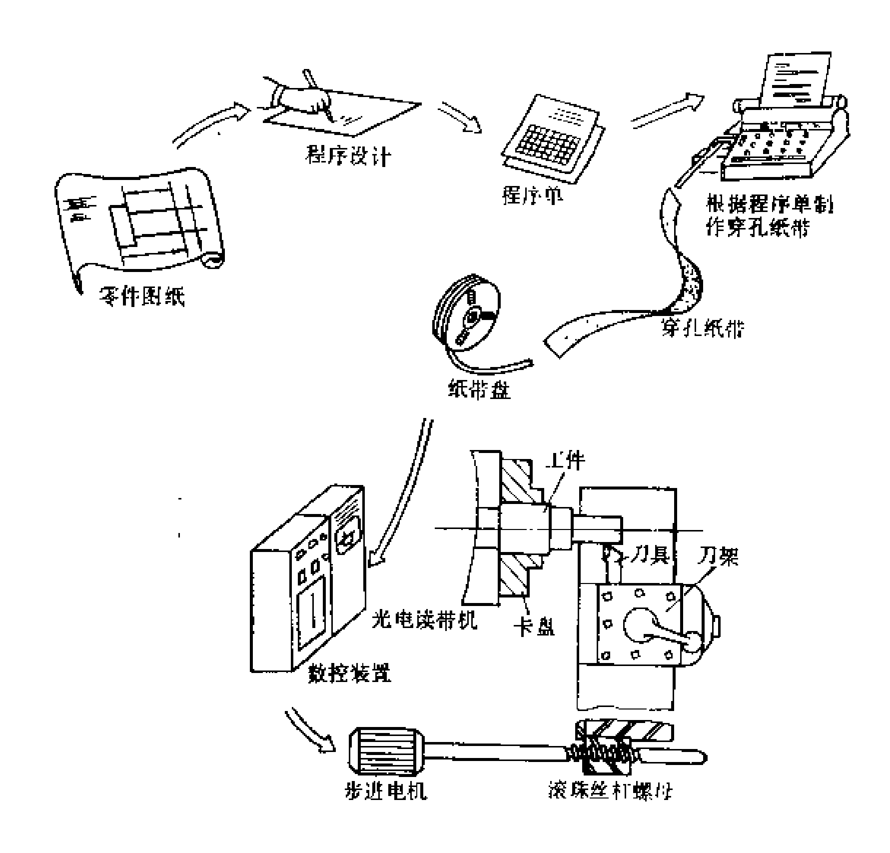


图5-21　数控机床工作原理示意图

的尺寸、形状特征，对加工面进行程序设计，将加工要求及有关的数据、资料（如机床动作的先后次序和移动量、切削用量等），按照一定的规则编成数码（数字）和指令码，统称为

代码，并填入程序单中；再根据程序单制作穿孔纸带，把填入程序单的代码记录在穿孔纸带上；然后将穿孔纸带放入光电阅读机中，通过光-电转换使这些代码变成电的信号，输入数控装置；数控装置根据输入的信号进行运算和控制，向机床的伺服机构发出各种控制信号。输入的指令码信号，通过控制器使机床进行各种动作，如控制机床某个部件的启动和停止、运动的方向、速度等；输入的数码信号进入运算器运算后，向机床伺服驱动装置发出电脉冲，用以控制机床各部件运动的坐标量，最后通过驱动装置带动传动机构（如滚珠丝杠、螺母）使机床的工作部件按一定的规律和顺序动作，加工出符合图纸要求的零件。

数控机床按其被控制量有无检测与反馈可分为开环控制系统和闭环控制系统，如图5-22所示。图5-22（a）为开环控制系统。数控装置根据穿孔纸带上的指令，经过运算，给驱动装置发出一定的信号，驱动装置中的驱动机（步进电机）便转过一定的角度，带动滚珠丝杠螺母使机床工作台（刀架）移动一定距离，但无检测装置来检测工作台的实际移动量。这种对被控制量不进行检测，不将被控制量的实际值反馈回去与指令值进行比较的系统称为开环控制系统。这种系统的加工精度由执行机构的精度和机床传动机构的精度来保证。目前，其定位精度一般为±0.02mm，少数达到±0.01mm。其结构比较简单，调试和维修方便，工作

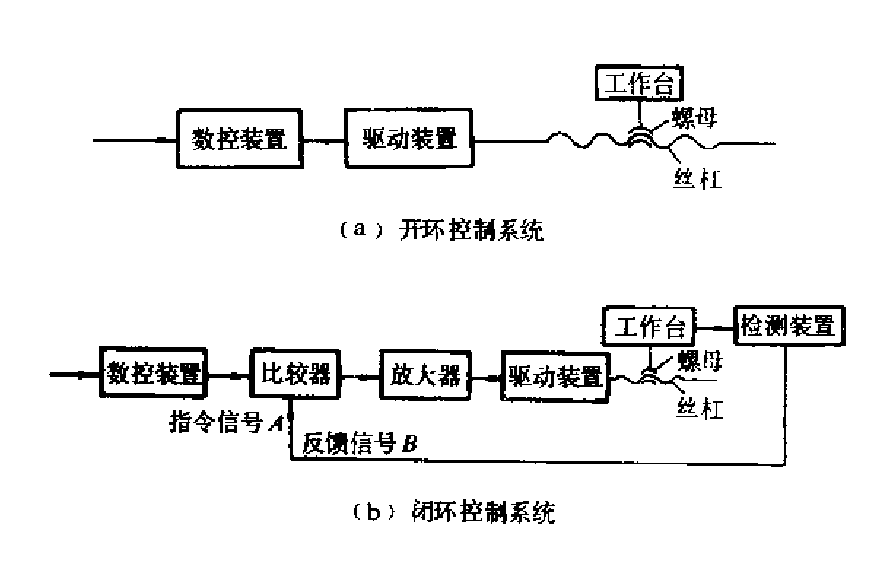


图5-22 数控机床的控制系统原理图
（a）开环控制系统；（b）闭环控制系统

较稳定，成本较低，因此近年来发展较快。图5-22（b）为闭环控制系统。数控装置根据穿孔纸带上的指令，发出指令信号A，工作台移动后通过检测装置测出工作台的实际移动距离，然后向比较器发出反馈信号B，比较器即比较A和B，当A减B大于零时，工作台继续移动，只有当A减B等于零时，工作台才停止移动。这类对被控制量进行检测，将实际值与指令值进行比较，用差值进行控制的控制系统称为闭环控制系统。由于这种系统的加工精度由检测装置保证，故其定位精度较高，目前可达到±0.01mm以内。但其结构较复杂，调试和维修较困难，成本较高。

数控机床按其控制刀具相对工件移动的轨迹可分为：点位控制系统、直线控制系统和连续（轮廓）控制系统，如图5-23所示。

点位控制系统如图5-23（a） 其特点是只要求控制刀具获得准确的坐标点位置，至于从一点到另一点的运动轨迹则不加控制，而且刀具在移动过程中不进行切削。钻床、冲床和

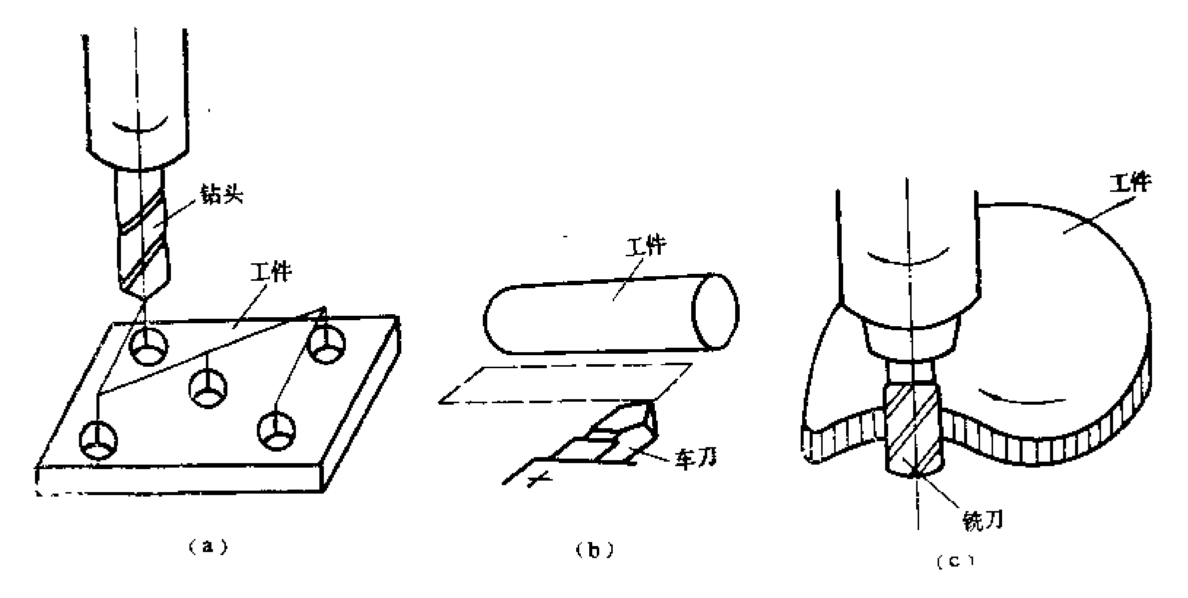


图5-23 控制刀具相对工件移动轨迹的几种形式
(a)点位控制系统；(b)直线控制系统；(c)连续(轮廓)控制系统

坐标镗床等采用这种控制系统。

直线控制系统如图5-23(b) 其特点是除了控制刀具位移的终点位置外，还要保证被控制的两个坐标点间刀具移动的轨迹为一条直线，刀具在移动过程中要进行切削，其进给量也要控制。车床、铣床和磨床等采用这种控制系统。

连续(轮廓)控制系统如图5-23(c) 其特点是对两个或两个以上坐标方向的运动同时进行控制，它不但要控制刀具移动的每一个位置，而且还要控制每个坐标方向的运动速度，即刀具的运动轨迹必须满足被加工零件轮廓形状的要求。车床、铣车、磨床和齿轮加工机床等采用这种控制系统，用于加工各种成形表面。

数控机床上更换加工对象所需的代价是很小的，因为只需要另行编制穿孔带。机床调整简单，大大减少了准备、结束时间和辅助时间，缩短了生产周期。因此非常适宜于批量小、周期短、改型频繁、形状复杂以及精度要求高的中小批零件的加工。

3. 加工中心机床(自动换刀数控机床)

在一般数控机床的基础上，增加一套自动换刀装置，发展成为新型的、高自动化的自动换刀数控机床(即加工中心)，它是多工序可自动换刀的数控镗铣床。它有多个坐标控制系统，并可实现点位控制进行钻镗铰或直线以及连续控制进行铣削。各种刀具装在一个刀库中，工件在机床上一次安装后，由穿孔带发出指令控制机床自动更换刀具，依次地对工件各面(除底面以外)自动完成钻、扩、铰、镗、铣、攻丝等多种加工。有的加工中心还能自动更换主轴箱或工作台。它改变了过去小批生产中一人、一机、一刀和一个工件的落后局面，而把许多相关工序集中在一起，形成了一个以工件为中心的多工序自动加工机床，它本身就相当于一条自动线。

加工中心适合于中、小批量形状复杂的工件，实现了连续多面、多工序自动化加工。节省了辅助时间，提高了加工效率。并由于工件在一次安装中完成，更好地保证了加工表面间相互位置精度。

4. 自动线

在机械工业中，为了适应大批大量生产的需要，产生并广泛采用了各种类型的加工自动线。自动线就是按工件的加工工艺顺序排列的若干台自动机床，用传送装置和控制系统联系起来的自动作业线。在自动线上，毛坯（或原材料）从一端输入，无须工人直接操作，就能自动地通过各个加工工位，自动完成全部加工过程，从另一端输出成品。自动线的应用可以提高产量，降低产品成本，减轻劳动强度，节约厂房面积，保证产品质量等。

自动线是由自动机床或组合机床、传送机构和操纵机构等几个部分组成。自动线的联接方式，可以是刚性联接（传送装置把各工位的工件同步移到下一个工位，同时开始加工，加工完毕又同时移到再下一个工位，工件依次通过各个工位后即加工完成。各工位之间没有缓冲环节，任一工位停歇，必然使全线停车），也可以是柔性联接（在相邻两个工位之间设有贮料仓，贮存一定数量的备件，如某一工位出现故障，则贮料仓中的备件可以起到缓冲、补充作用，因此个别工位的停歇不致影响全线的正常工作。各工位也不完全要求同步启、停）。

自动线的类型可分为四种：

1）　用自动化的通用机床及标准传送机构组成的自动线

这种类型的自动线，其组成方式灵活性大，组成自动线的周期短。自动机床既可在自动线中使用，又可在一般生产中作为自动单机单独使用。

2）　用组合机床及标准传送机构组成的自动线

这种类型的自动线具有设计制造快、工作可靠、可根据产品的变换重新组装、造价较低等优点。因此应用最广泛，我国的自动线中，75%是这种类型。

3）　用专用机床及专用传送机构等辅助设备组成的自动线

这种类型的自动线所采用的机床和设备，都是针对某一零件的工艺过程专门设计和制造的，可获得较好的效果。但是，设计制造周期长、投资大，对产品改型的适应性很差。

4）　用数控机床及自动传送机构组成的自动线

自动线是生产过程自动化的一种高级形式。特别适合于汽车、拖拉机、电机、轴承以及弹药和自动武器等的大批大量生产中。自动线的设计、制造和使用，也是一个国家工业技术水平的标志之一。

自动线的进一步发展便是创立自动化车间和自动化工厂。

第十三节　成组技术（GT）

一、概述

为了简化编制工艺规程的工作，避免重复劳动，缩短生产技术准备周期，提高工艺规程的质量，在三十年代末提出了工艺规程典型化。其基本思路是首先按工艺过程的相似性把零件分类，并在每类零件中选一个典型零件；然后只编制典型零件的工艺规程，同类的其它零件均采用典型工艺规程，不必再逐一编制。工艺规程典型化曾取得了显著的技术经济效果。

在工艺规程典型化的基础上，五十年代末又发展了一项技术，当时称为成组加工（用视检法将零件进行分类），后来发展为成组工艺（利用成组工艺改变原来的工艺流程和加工设备的平面布置等），现在则发展成为成组技术。成组技术早已超越了工艺和机械加工的范畴，扩展到铸、锻、焊等工种，以及设计、生产管理、设备布局等等生产活动的各个领域。

成组技术利用计算机等自动化手段对产品零件进行分类、设计工艺规程，在加工、装配、生产管理等活动中应用这种原理，建立了各种成组加工单元、成组装配单元，使多品种中小批量的生产提高了效率。成组技术取得了比工艺规程典型化更大的技术经济效果。

在机械制造业中约有75～80％是多品种、小批量生产的企业。由于社会需要的变化和市场竞争的加剧，原属大批大量生产的企业为了提高经济效益，也要改变单一品种为多品种生产，因此品种多样化就越来越突出，使小批量生产的比例越来越大。小批量生产是不能采用适用于大批大量生产的工艺和设备的。一般来说，要提高生产率，降低成本，只有扩大一次投入的零件批量才能实现，才有可能采用专用工艺装备和高效机床。而成组技术其本质就是将结构和工艺相似的零件集中在一起以扩大零件的批量，使大批大量生产中行之有效的高生产率的工艺方法和设备用到中小批生产中去，使中小批生产也能取得较高的技术经济指标。

目前，成组技术已把计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺规程编制（CAPP）和计算机辅助制造（CAM）有机地联系起来，正向更高的阶段发展。成组技术是现代数控技术、柔性制造系统和高度自动化的集成制造系统的基础。

二、成组技术的工艺准备

1．零件的分类编码

零件的分类编码是成组技术最重要的环节。分类编码是否合理直接关系到采用成组技术的技术经济效果。所谓零件的分类编码，就是首先按照零件轮廓形状、尺寸大小、需加工表面的一致性、毛坯的同类性以及加工表面精度和表面粗糙度的接近程度（按加工设备和工艺装备的相似性），对零件进行分类；然后用一系列数码分别表示零件的形状、尺寸、加工表面、材料及精度等特征。目前，世界各国已研制出数十种分类编码系统。有以零件形状结构特征为基础的分类编码系统，也有以加工工艺方法为基础的分类编码系统。有码位多、描述详细的分类编码系统，也有码位少、简明的分类编码系统。1979年我国机械工业部机床局主持制订了我国“机床零件编码法则（草案）”（JCBM）。1982年我国机械工业部又主持制定了“机械行业成组技术零件分类编码系统（第一版）”（JLBM-1），终审报批后在全国试行。JLBM-1系统参考了联邦德国奥匹兹（Opitz）教授研制的奥匹兹法则、日本KK-3分类系统和我国的JCBM法则。采取名称矩阵、主码、副码和备用特征码等16位数字，分别表示零件的名称、外形、外形要素、内形、内形要素、外平面、内平面、端面、辅助孔、材料和毛坯、热处理、直径、长度、精度、特殊尺寸、特殊精度等项内容。

下面以奥匹兹分类系统为例，具体介绍零件分类编码的概况。

奥匹兹分类系统具有很好的适用性，是一种比较优越的分类系统，为欧洲多数企业所采用。奥匹兹分类系统中，每个零件用自左向右顺序的九个码位的九位数来表示，每个码位有0～9十个数（即特征码）。第一至五码位为基本代码，或称主码或形状码。第一码位表示零件的类别，它决定工艺特征和采用的机床种类。其中特征码0～5为回转体零件。6～9为非回转体零件。第二到第五码位表示零件的加工特征，第二码位表示外部形状，第三码位表示内部形状，第四码位表示平面加工，第五码位表示辅助孔和齿形；第六至九码位为辅助代码（副码），表示零件的制造工艺特征，其中第六码位表示零件的尺寸，第七码位表示零件材料，第八码位表示毛坯种类或形状，第九码位表示加工表面的精度。奥匹兹分类系统基本代码见表5-5，辅助代码见表5-6。

表5-5 奥匹兹分类系统基本代码表

第一码位		第二码位		第三码位		第四码位		第五码位	
零件类		外表面形状及其要素		内表面形状及其要素		需加工的平面		辅助孔及齿形	
0	回转形：盘状 $\frac{L}{D}\leq 0.5$	0	光滑，无形状要素	0	无通孔，无盲孔	0	无平面加工	0	无辅助孔
1	回转形：短轴 $0.5<\frac{L}{D}<3$	1	光滑或一端台阶：无形状要素	1	光滑或一端台阶：无形状要素	1	外平面或单向弯曲面	1	无齿形：无位置要求的轴向孔
		2	光滑或一端台阶：有螺纹	2	光滑或一端台阶：有螺纹	2	几个外平面在一个圆周上等距配列	2	无齿形：有位置要求的轴向孔
		3	光滑或一端台阶：有工作槽	3	光滑或一端台阶：有工作槽	3	外部键槽或槽	3	无齿形：无位置要求的径向孔
2	回转形：长轴 $\frac{L}{D}\geq 3$	4	两端台阶：无形状要素	4	两端台阶：无形状要素	4	外花键或多边形	4	无齿形：无位置要求的径向孔、轴向孔等
		5	两端台阶：有螺纹	5	两端台阶：有螺纹	5	外表面及其槽、浅槽和花键	5	无齿形：有位置要求的径向孔、轴向孔等
3	非回形件：有变异的 $\frac{L}{D}\leq 2$	6	两端台阶：有工作槽	6	两端台阶：有工作槽	6	内平面及浅槽	6	有齿形：[illegible]齿轮
		7	有工作锥度	7	有工作锥度	7	内花键或多边形	7	有齿形：锥齿轮
4	非回形件：有变异的 $\frac{L}{D}>2$	8	有传动螺纹	8	有传动螺纹	8	内外花键或槽	8	有齿形：其它齿形
5	其它回转体零件	9	其它（>10倍工作直径）	9	其它（>10倍工作直径）	9	其它	9	其它

〔注〕：1．第一码位中6～9为非回旋体零件（略）；

2．表中L—零件长度；D—零件直径。

表5-6 奥匹兹分类系统辅助代码表

第六码位		第七码位		第八码位		第九码位	
零件尺寸（直径D或边长A，mm）		零件材料		毛坯种类		加工精度	
0	≤20	0	灰铸铁	0	圆棒	0	无精度要求
1	>20≤50	1	球墨铸铁、可锻铸铁	1	圆棒光拉或去皮	1	IT6
2	>50≤100	2	钢≤420MPa不热处理	2	棒材：三角、四角、六角	2	IT7
3	>100≤160	3	钢>420MPa热处理低碳钢及表面硬钢不热处理	3	管材	3	IT9
4	>160≤250	4	钢，热处理	4	角钢、U形钢、T形钢	4	IT10
5	>250≤400	5	合金钢，不热处理	5	薄板	5	IT7～3
6	>400≤600	6	合金钢，热处理	6	中板或厚板	6	IT5～6
7	>600≤1000	7	有色金属	7	铸锻件	7	IT10～6
8	>1000≤2000	8	轻金属	8	焊接组合件	8	IT8
9	>2000	9	其它材料	9	粗加工零件	9	IT10～7

〔注〕：表中加工精度是核算的，仅供参考。

现以图5-24所示的零件为例，采用奥匹兹分类系统对它进行分类编码。这个零件是回转体零件，$L/D=75.2/48.5\approx1.6$，第一码位的数是1；一端有台阶，并有紧固螺纹，第二码位的数是2；无内孔，第三码位的数是0；有键槽，第四码位的数是3；有四个轴向孔，与其它要素无位置要求，第五码位的数是1；直径$D=48.5$，第六码位的数是1；材料为合金钢，不热处理，第七码位的数是5；毛坯为圆钢，第八码位的数是0；加工精度无要求，第九码位的数是0。因此，这个零件采用奥匹兹分类系统的代码是120311500。

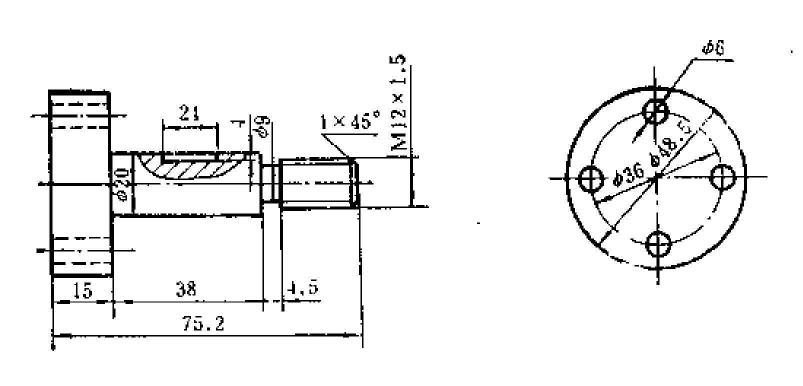


图5-24 回转体零件

2. 拟订成组零件的工艺规程

对零件进行分类编码后，即可按代码相同或相近的零件组成零件组。如果仅仅把代码相同的零件分为一组，则每组零件的数量往往很少，达不到扩大批量的目的。因此还应把代码相近的零件合并进来。实际上代码不完全相同的零件，往往也具有同样的工艺过程。从零件分类编码中可以发现，其中有一些码位表达了重要的工艺信息，而另一些码位则与工艺关系不大。有些类型的零件可用第一、二码位的数决定工种，如车、铣等；第六码位的数（尺寸），决定所需的机床规格；第七码位的数决定加工条件等。因此，可以把一、二、六、七码位作为零件分组的特征码位，只要这几个码位的特征码相同，就列为同一组，这就是码位相近的含义。在按代码相同或相近的零件组成零件组后，便可拟订成组零件的工艺规程，即只需拟订每组零件中的典型综合零件的工艺规程，而不需单独拟订每个零件的工艺规程。"综合零件"综合了一组零件中所要加工的全部表面，因此该组中任何一个零件，都可以按成组工艺规程来加工。综合零件可以是一个实际零件，也可以是一个假想零件。

图5-25表示由Ⅰ至Ⅹ十个零件组成的零件组，图中A综合了全组零件的结构工艺特征，A就是一个代表这组零件的假想综合零件。按综合零件A所拟订的工艺规程，就是该组零件的成组工艺规程。

3. 选择或改装、设计机床设备

根据成组工艺规程，可制定出按工序统计的机床负荷时间表，即可选定成组零件加工所需的机床设备。成组技术选定机床设备时，有两种情况：一是利用现有的通用机床或适当改装后，再配置成组夹具和成组刀具，以适应成组工艺的需要；另一是设计适合成组工艺的高效专门化机床和工艺装备。选定机床设备后，还要对机床负荷进行平衡，若某些机床负荷不足或过高时，要调整零件组，以使机床负荷达到基本平衡。

4. 设计成组夹具和成组刀具

成组夹具应按全组零件共同的定位、夹紧方法进行设计，具有较大的通用性。为此成组

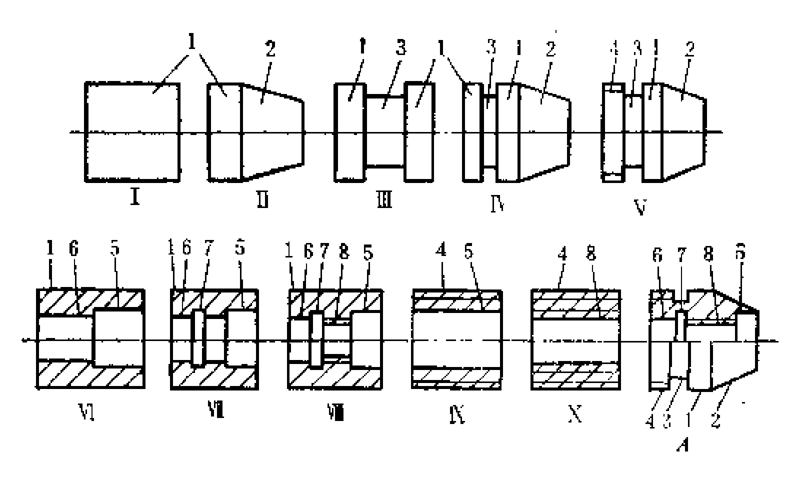


图5-25 确定综合零件

1—外圆柱面；2—外圆锥面；3—外凹槽；4—外螺纹；

5—右端圆孔；6—左端圆孔；7—内沟槽；8—内螺纹；

Ⅰ～Ⅹ—成组零件；A—综合零件

夹具一般由通用基体和可换可调件两部分组成。通用基体包括夹具体、传动装置和夹紧机构等，它们对于零件组是通用的。可换可调件包括定位元件、夹紧元件和导向元件等，这部分是针对同组各种零件设计的，可以采用更换和调节方式，以适应全组零件的不同尺寸。成组夹具还应保证调整方便、迅速，并有足够的精度和刚性。成组刀具也应设计成适用于加工全组所有的零件，其局部调整也必须迅速、简便。

5． 按成组技术的要求，确定生产组织形式

三、成组技术的生产组织形式

随着成组技术的深入应用和发展，它的生产组织形式已由最初低级形式的成组零件单机加工逐步发展到成组生产单元、成组流水线和自动线，以至现代最先进的柔性制造系统和无人化工厂。

1． 成组零件单机加工

成组零件单机加工是由一台设备完成零件组全部加工过程，例如在六角车床、自动车床上加工回转零件。显然其成组零件的结构形状要素不能差异过大，相似程度必须很高。也可以是成组工序，即一台设备只完成成组零件的某一工序，其余工序仍然是单独工序，或者也是成组工序，分别在其它机床上进行。

这种组织形式，可获得一定效果，但它不能更大地发挥成组技术的突出功效，相反却给生产组织管理带来不便。

2． 成组生产单元

成组生产单元是采用成组技术车间的基本生产单位。它能完成一个或几个零件组的全部工艺过程，配备了所需要的全部机床设备，构成车间内的一个小的封闭生产系统。图5-26表示一个生产单元的平面布置形式。

该生产单元加工的零件按奥匹兹分类系统进行分类编码，得出六个尺寸相当、工序内容相似的零件组。这六个零件组可以采用相似的机床和工艺装备进行加工。每个零件组的综合零件及其代码，如图的上部所示。按各组零件的分类代码，从成组工艺规程中查出其工艺路线，如图的中部所示。根据各零件组的工艺路线，决定由车、铣、钻、磨四台机床组成一个生产单元。零件组的全部零件，都可在这四台机床配置的生产面积上，完成其全部机械加工

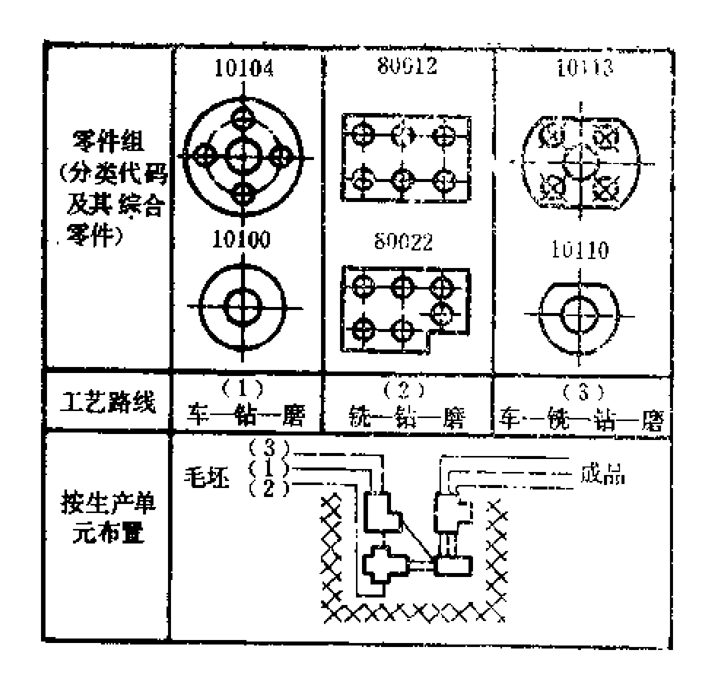


图5-26 成组生产单元平面布置示意图

过程。平面布置形式如图的下部所示，图中（1）、（2）、（3）表示工艺路线。

目前，成组生产单元已成为小批生产经济而合理地实现高度自动化的必要前提，已为世界各国企业广泛采用。

3．成组生产线

成组生产线是按零件组的工艺过程组织起来的，各工序的节拍一致，生产线工作连续而有节奏。成组生产线与普通生产线的区别在于，在生产线上流动的不是一种零件而是一组零件。

成组生产线又分为两种形式：成组流水线和成组自动线。成组流水线是在工序之间采用滚道或小车运输工件，其工艺适应性比较大。成组自动线则是采用各种自动运输机构输送工件，其生产效率更高，但能加工的工件种类较少，因为它的工艺能力可变范围较小。

4．柔性制造系统和全盘无人化工厂

成组自动线要求组内零件具有较大的相似性。为发展多品种小批量生产，要求生产系统具有更大的柔性。柔性制造系统（详见下节）具有高度自动化程度和很高的生产效率，是一种较为完善的、理想的成组技术的生产组织形式。

为了适应国际上生产技术发展趋势，日本不仅大力发展柔性制造系统，而且还正在建造世界上第一个以成组技术为基础的全盘无人化工厂。据称该厂将拥有20000～30000m²面积，制造上万种零件，五十种不同部件，批量为1～25件。从毛坯制造到部件装配全部工艺过程都采用成组技术。

四、成组技术的技术经济效果

成组技术的技术经济效果是多方面的，现将其归纳如下：

1．由于成组技术可以扩大生产批量，使机械工业中约占75～80%的多品种、小批量生产能采用先进工艺和高效机床设备进行，从而取得同大批大量生产一样的技术经济效果。

2．成组技术可以使产品质量稳定。成组技术消除了零件工艺规程不必要的多样性，使加工工艺更趋近合理，因而质量稳定、可靠；工人在成组生产单元或成组生产线上工作，其

工序专业化程度高。由于采用自动化程度较高的机床和工艺装备，减少了人为因素对加工质量的影响，保证了质量。

3. 成组技术可以简化生产技术准备工作，缩短生产周期。成组工艺规程减少了编制工艺文件的工作量，工艺人员避免了繁重的工艺文件编制工作；成组工艺装备通用化程度高，减少了设计制造工艺装备的人力、物力、财力。所有这些不仅简化了生产技术准备工作，而且使生产周期缩短，加速了资金周转。

4. 成组技术可以促进设计的标准化与合理化，有利于发展新品种。设计新产品时，根据成组技术零件分类编码系统，可以直接构思零件的代码，由成组零件图册中查出结构、作用、形状、尺寸非常接近的零件图。大部分零件不必重新设计、画图，大大减少了设计工作量。少数零件虽然需要重新设计，仍可通过分类归并到相应的零件组中，此外还有成组工艺规程、成组夹具、成组刀具等可供利用，缩短了新产品的设计周期和费用。零件的分类编码和集中存贮，更有利于实现结构形状和尺寸参数的标准化和规格化，减少了零件的规格品种。

5. 成组技术可以改善经营管理，有利于实现管理现代化。成组技术的管理以生产单元为基础，改变了惯用的以生产工艺专业化（如机群班组）为前提的管理，提高了零件加工的适应性，减少了非必要的班组间协作；生产单元基本实现三定（定人、定活、定机床），工艺路线和加工方法相近似，机床、工艺装备的调整简单，便于计划调度；生产单元加工成组零件不必按批投入，可以几件甚至逐件传送，减少了在制品的数量和在制时间，也减少了运输工作量。所有这些均为实现科学管理创造了有利条件。

第十四节 计算机辅助制造（CAM）

随着科学技术水平的提高，大规模集成电路的出现，使计算机技术得到迅速的发展，几乎各个领域都引入计算机和计算机技术。在机械制造行业中，也从数控机床和成组技术发展到计算机辅助制造。现代的计算机辅助制造包括：把产品的设计信息转换成加工制造信息，控制产品的加工、装配、检验、试验、包装等全过程，以及与这些过程有关的全部物流系统和初步的简单生产调度。可见，CAM包括的内容非常广阔，这里仅对其中的三点作一简单介绍。

一、机床的计算机控制

通常每台数控机床均配置有一台数控装置，它是硬接结构的专用数控装置，其逻辑功能不能改变，因此它是一个独立的系统，独立地进行生产控制，它与机床以外没有任何信息交流。数控机床的加工指令数据通常应用穿孔纸带，每加工一个零件都需制作穿孔纸带。重复加工同一零件时，就得将穿孔纸带重复通过光电读带机将纸带的信息输入到数控装置。穿孔纸带的检查、维护很麻烦，可靠性也很差，数控机床虽适应于单件小批生产，但成本很高。当大规模集成电路和微处理机广泛使用后，用廉价、功能强的微处理机来代替专用昂贵的数控装置的数控机床日益增多。

1. 计算机数字控制（CNC）

用一台小型计算机部分或全部地代替数控装置来控制数控机床的工作，称为计算机数字控制。为了使小型计算机能起到某一数控装置所具有的功能，必须预先编制专门程序，并把

它储存在磁芯存储器内，这种程序称为“控制程序”（软件）。如果改变“控制程序”就能改变数控的功能。因此，采用小型计算机控制机床，具有非常大的灵活性，可用不同的“控制程序”纸带，由读带机输给存储器，使小型计算机完成不同的数控功能，以适应加工需要。

2. 直接数字控制（DNC）

数控或计算机数字控制主要用于一台机床的控制。如果用一台计算机来管理控制几台甚至上百台数控机床，这叫做直接数字控制，或称“群控”。在DNC工作时，计算机通过读带机把穿孔带上记载的准备加工各工件的尺寸几何参数、工艺参数、各机床的作业进程计划以及有关控制程序等读取进去，存入计算机中央处理装置的磁盘或磁鼓外存储器内。加工时，可用程序运转方式（根据事先编好并已存入存储器的加工进程计划，依次取出各工件的加工程序指令）或呼叫运转方式（由操作者根据需要，通过编码器把要加工工件及其数量利用代码通知中央处理装置，调出有关工件的加工程序指令）来控制机床运转。

根据数控机床与计算机或中央处理装置结合形式的不同，可把DNC分为两大类：

（1）间接“群控”（DNC中的K系统） 在此系统中，电子计算机存储的程序，通过连接装置分别送到每台机床的数控装置中，而不再需要经过读带机。

（2）直接“群控”（DNC中的T系统） 在此系统中，电子计算机存储的程序，通过分时多路数控装置，直接控制数控机床，把各台数控机床数控装置的功能全部集中到计算机的中央处理装置来完成。而对于各数控机床来说，只需配备一个简单的机床控制装置即可。

把一群已在使用的数控机床，通过连接装置和电子计算机联接起来就能结合成间接“群控”，便可提高自动化程度，此时，这些机床脱离计算机仍能独立工作。后一种结合形式由于机床群中各台机床不需要再装数控装置，故成本较低。此外，该系统除机床和控制装置外，电子计算机和分时多路数控装置可以安装在环境条件较好的恒温室内，所以产生故障的机率大大减少，工作可靠性得到很大的提高。

3. 适应控制（AC）

适应控制是不同于数字控制的一种自动控制技术。

一般的数控机床只能根据事先编好的程序进行工作。而在编程时，为了避免可能产生的工作条件突然恶化（如碰到材料中的硬点、刀具损坏等），而使机床或刀具出问题，故在选择切削用量时都要留有余地，这就不能最充分地发挥机床的能力。

适应控制却能通过装在机床上的有关参数（功率、扭矩、切削力、工件尺寸、粗糙度、切削温度等）检测装置（传感器），将因加工条件改变而发生变化的上述有关参数的变化量测量出来，并送回适应控制装置，且与预先存入的参数进行比较和分析，进而发出信息使机床根据瞬时的加工状态自动改变切削用量（f、v、a_p），以“适应”给定的加工要求。这样，使机床始终在最佳工作状态下进行工作。由于适应控制可对加工条件的变化及时作出反应，能够自动地调整切削用量，充分利用工艺系统（特别是机床和刀具）所提供的加工能力，因而能够提高工件的加工精度，减小表面粗糙度，避免废品损失，提高生产率，以最经济、最高效的加工把符合图纸要求的工件制造出来。

二、计算机辅助制造（CAM）系统

计算机辅助制造系统就是用分级计算机来控制与制造过程有关的生产、技术设计及财务管理等方面的工作。CAM系统由硬件和软件组成。硬件包括数控机床、检测装置、数字计

算机等，软件是指一个计算机编程系统的信息网络，其功能是用来进行监测、处理和最终控制作业信息流和CAM的硬件。

图5-27所示为一个大规模的CAM分级结构，它包括与制造过程有关的三个方面：生产管理与控制，技术设计与准备以及财务会计和供销的管理工作，每一个方面都包含若干个子作业，这一系统相应于三级计算机控制。最下层为第三级，各子作业由专用小型计算机管理。例如直接控制各数控机床完成给定的工艺过程。计算机直接输出各台设备所需的信息，并对加工过程反馈回来的信息及时加以分析和运算，再输出控制信息。信息的双向流动是CAM最大的长处。第二级计算机一般称为主机，主要用于对上述各小型计算机执行监控及发布指令，如收集或分配数据，编制专用计算机程序，担任上下两级计算机的通讯以及文件管理和数据转换工作等。第一级为中央计算机，是一台较大型的计算机，担任整个系统的管理工作。例如收集处理来自主机的信息，并从总的管理角度来控制各个第二级的主机。整个CAM系统，不仅从上到下，从下到上，而且在横向（生产、技术和管理）都存在信息的双向联系。

在这多级计算机控制系统中，某些主要功能可以互相转换和替代，因此局部故障不会引起全系统停机，从而大大地提高了可靠性和利用率。

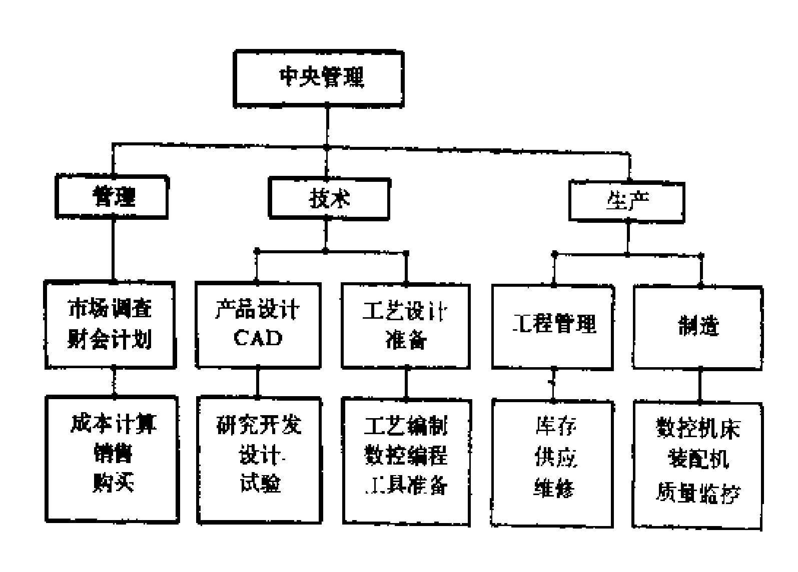


图5-27　计算机辅助制造的分级构成

下面介绍两个制造系统：

1．集成制造系统（IMS）

计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）的软件系统是分别研制和开发的，生产技术的高度发展要求设计与制造在产品生产的全过程中有机地结合，实现一体化。因而便发展了集成制造系统，如图5-28所示。图中水平Ⅰ至水平Ⅴ的总体即称为集成制造系统，它包括CAD和CAM两个方面，在此系统中，可以建立产品设计与制造两方面的直接联系，即直接利用设计数据进行数控编程以及进行工、夹具设计制造。图中水平Ⅱ是CAM领域，它包括了水平Ⅲ的加工系统、装配系统及最终成品的检查单元。水平Ⅳ是生产单元，在加工系统中，由于加工零件种类的不同(例如轴类、方形类零件等)，它可以分成许多生产单元（如图中的1至N个生产单元），每个生产单元都是由直接数字控制来控制与管理水平Ⅴ的各

种机床（如CNC、AC等）。如果把各生产单元内部或生产单元之间用输送装置把机床、自动仓库和DNC计算机有机地连接起来，就形成柔性制造系统，由此可见，集成制造系统具有制造领域所需的一切功能。

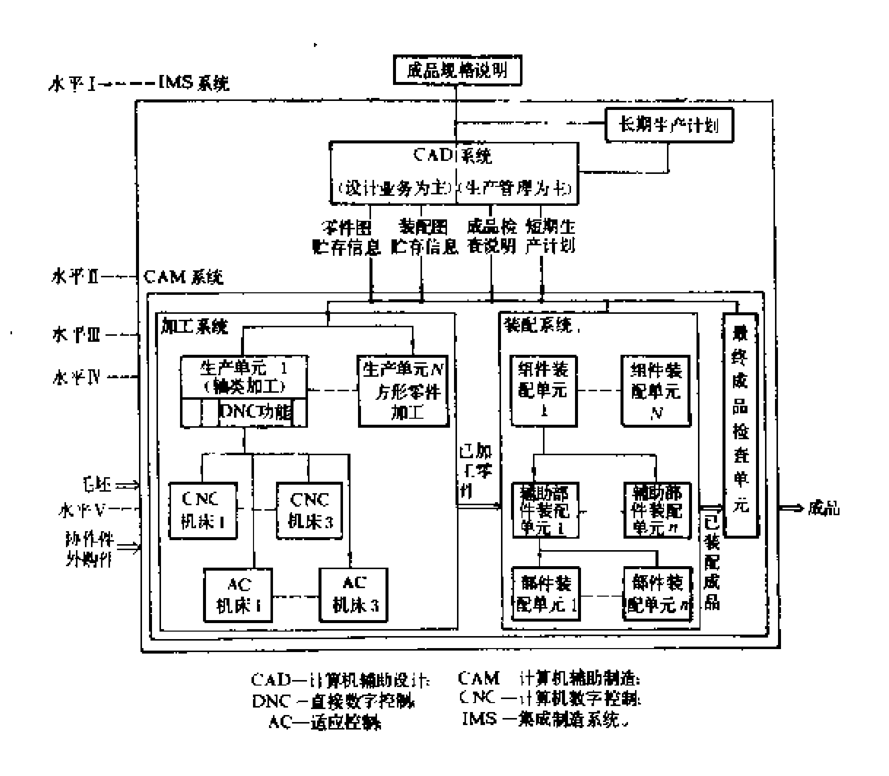


图5-28 计算机辅助制造系统的构成框图

2. 柔性制造系统（FMS）

FMS是为适应多品种、中小批量机械加工而发展起来的。它是CAM发展到现阶段最先进的一种机械加工系统。它区别于其它CAM系统的主要特征在于，它具有较大程度的柔性加工可变性。特别适应于多品种、中小批量的生产，它能提高多品种、中小批量生产的劳动生产率，加快产品的更新换代和技术改造，提高产品性能和质量，降低产品成本，它能使这种类型的生产达到高效、自动化的先进水平。

通常机械生产系统或单台机床的生产率高时，其柔性程度往往降低。因此针对不同的批量和品种数常需采用不同的生产系统和设备。图5-29是几种生产系统的加工适应范围示意图。当加工零件品种少时，应采用专用高效机床及组合机床刚性自动线，而当品种增多时，则采用可变组合机床自动线、FMS和MC比较适合。FMS的柔性表现在：

（1）可以加工几种到几十种具有不同型式、不同尺寸的工件。

（2）允许中断正常的生产过程，并能迅速地转变到其它产品的生产过程上去。

（3）系统中的设备具有可变性以通过变换来实现不同的加工任务。

（4）系统软件可以自由选择。

FMS的适应范围很广，其批量大约为5～1000件，品种4～100种。

FMS是由计算机控制的信息系统，自动化物料输送系统和多工位数控加工系统三部分组成。这三部分功能全部由计算机控制系统管理，各工序或机床间的联系不象刚性自动线那样由固定节拍决定，而是进行实时控制，高效地改变工序顺序和周期，因此零件输送是按工序

实际时间来控制的，只要零件在机床上的工序完成，系统立即把零件输送到下一工序的加工

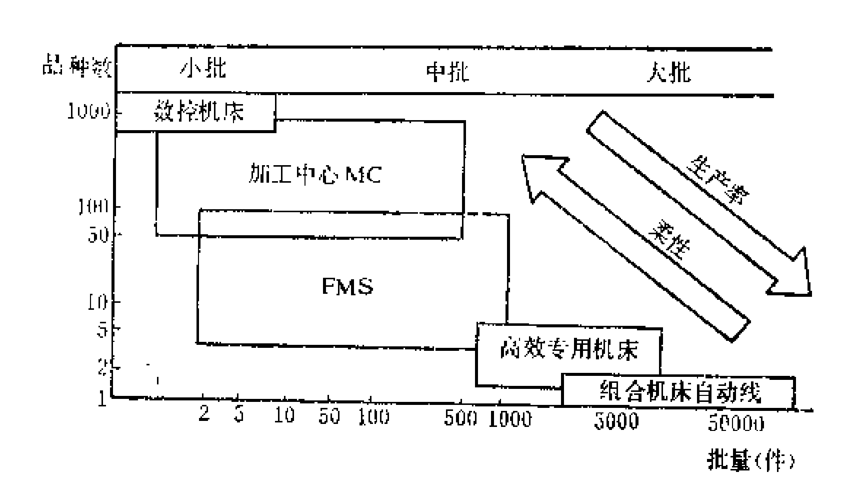


图5-29 各种制造方法的适应范围

机床上去。

FMS以成组技术为基础，它一方面完成零件自动化加工，另一方面能在一定范围内完成相似零件组中不同零件的不同工序，亦即当某组零件加工完毕之后能自动向另一组零件转换，不必停机调整。

由上述可知，FMS经济地满足产品多变的要求，使中小批企业提高了生产水平和市场竞争能力，获得更大利润。又由于加工过程中自动更换刀具、输送工件和自动检测，更好地保证了产品质量，并使人的介入减少到了最少，使人们从单调繁重的工作中解放出来，创造了理想的工作条件。

三、计算机辅助工艺规程编制（CAPP）

计算机辅助工艺规程编制也叫工艺规程自动设计（APP），是指采用计算机设计零件的制造工艺规程，包括制订工艺路线（选择加工方法及安排工序顺序）和工序设计（选择加工机床和刀夹量具，确定切削参数和计算工时定额），最后编制出完整的工艺文件。

CAPP从根本上改变了依赖于个人经验，人工编制工艺规程的落后面貌，促进了工艺过程标准化和最优化，提高了工艺设计质量；它使工艺人员从繁琐重复的计算编写工作中解脱出来，极大地提高了工作效率，从而使工艺人员把精力集中去考虑提高工艺水平和产品质量等问题；CAPP能按照各种不同零件迅速编制出相应的工艺文件，缩短了工艺准备周期，适应了产品不断更新换代的需要，降低了工艺规程设计的费用；此外CAPP也为制定先进合理的工时定额和材料消耗定额以及为改善企业管理提供了科学依据。可见，要实现制造过程高度自动化，CAPP是必不可少的一环。

CAPP的工作原理，归纳起来有三种，即样件法、创成法和综合法。下面仅就样件法作一简单介绍。

样件法是目前用得较多的一种方法。样件法是在成组技术的基础上，将同一零件组中所有零件的形面特征合成为主样件，再按照主样件制订出反映本厂最优加工方案的工艺规程，并以文件的形式存在计算机中。当为某一零件编制工艺规程时，首先分析该零件的成组编码，识别它属于哪一零件组，然后调用该零件组的典型工艺文件。按照输入的该零件的成组

编码、形面特征、尺寸参数和表面粗糙度等，选出典型文件中的有关工序为该零件的加工顺序，选择机床和刀具，并进行有关工序的切削参数计算。调用典型工艺文件、确定加工顺序和计算加工参数都是自动进行的。如有需要还可对所编工艺规程通过人机交互进行修改（插入、更换或删除），最后编辑成所需要的工艺规程，并由计算机系统的终端把工艺规程文件显示并打印出来。这种方法的特点是系统较为简单，但要求工艺人员干预并进行决策。

第六章　枪管制造

枪管是自动武器中主要零件之一，最具有特征性。自动武器的制造特点，突出地在枪管制造中反映出来。所以，研究自动武器典型零件的制造，首先应研究枪管制造。

对典型零件制造方法的研究，通常按下列顺序进行：零件的结构与技术要求、零件所用的材料与毛坯、零件的制造过程、重点工序和特殊加工工艺以及零件的检验（某些零件包含试验）。

第一节　枪管的结构与技术要求

枪管具有内膛与外表面两个部分。内膛又由线膛与弹膛组成。

一、内膛的结构与技术要求

（一）线膛的结构与技术要求

1．线膛的结构　线膛部分有膛线，膛线的结构诸元是：

（1）膛线数目（n）　一般$n\approx 0.5D$（D为口径，以mm计），当$D=6\sim 8$mm时，$n=4\sim 6$，$D=10\sim 15$mm时，$n=8$，n应为偶数。

（2）膛线形状与宽度　国产制式武器，膛线断面形状呈矩形，习惯上称为矩形膛线，阴线宽a与阳线宽b之比，即a/b一般为$1.25\sim 1.7$。

（3）膛线深度（t）　一般$t=(0.01\sim 0.02)D$。

（4）膛线缠度（η）　国产制式武器，$\eta=28\sim 32$；缠角在线膛中不变化，为等齐膛线；膛线旋向一般为右旋；缠距（导程）$l=\eta D$。

2．线膛的技术要求

几种制式武器线膛的技术要求如表6-1所示。

表6-1　线膛的技术要求

技术要求 / 枪种	线膛尺寸mm			缠距 mm	表面粗糙度 Ra值 μm	材料硬度 N/mm²	径向铬层厚度 mm
	阳径	阴径	阴线宽				
59式手枪	$9^{+0.06}_{0}$	$9.27^{+0.075}_{0}$	$4.5^{+0.2}_{0}$	252	0.4～0.2	2410～3020	0.03～0.08
54式冲锋枪	$7.62^{+0.0035}_{0}$	$7.925^{+0.075}_{0}$	$3.81^{+0.2}_{0}$	240±1.3	0.4～0.2	2290～2550	0.06
56式冲锋枪	$7.62^{+0.06}_{0}$	$7.925^{+0.076}_{0}$	$3.81^{+0.2}_{0}$	240±5	0.2	2410～2850	不小于0.04
57式重机枪	$7.62^{+0.06}_{0}$	$7.925^{+0.076}_{0}$	$3.81^{+0.2}_{0}$	240±10	0.2	2690～3410	0.3～0.45
54式12.7mm高射机枪	$12.66^{+0.06}_{0}$	$13^{+0.1}_{0}$	$2.8^{+0.25}_{0}$	380^{+20}_{-10}	0.4	2690～3400	0.28～0.41
56式14.5mm四联高射机枪	11.5H10	14.93H10	3.4H14	420±10	0.2	3020～3680	0.41

从表6-1可以看出：

（1）阳、阴径的公差大部分不符合国家标准，其制造公差为0.06～0.1mm。

（2）阳径精度较高，一般为IT9～11级，但多接近于IT10级，阴径次之，为IT10～11级，阴线宽最低，为IT13～14级。

（3）表面粗糙度Ra0.4～0.2。

（4）材料硬度为2290～3680N/mm^2。

（5）径向铬层厚度为0.03～0.45mm。

由于弹丸与线膛的配合有特殊要求（弹丸与阴径之间的配合常有间隙，但此间隙应尽可能小；弹丸与膛线导转侧的配合高度的变化应尽可能小），同时还考虑到弹丸与内膛直径精度获得的难易程度，从而规定了线膛径向尺寸的制造公差为0.06～0.1mm；由于有些口径与制造公差是由英制换算过来的，国家标准是在此之后才制订的，所以线膛尺寸公差大都不符合国家标准。必须指出，今后设计武器，如无特殊要求，其尺寸公差应符合国家标准。

阳径是弹丸在膛内运动时的定位部，作用重要，且是用圆柱孔的加工方法得到的，制造较为容易；而阴径是由螺旋形凹槽所形成的，其作用是使弹丸获得旋转，并能防止工作时漏气，在阴、阳径精度相同的情况下，阴径的获得较阳径困难。根据作用的重要性及加工的难易程度，调整制造公差，使阴径的精度略低于阳径，这是合理的，合乎"工艺等价原则"的。

为了减小摩擦阻力，提高耐磨性以及抗蚀性，保证枪管的射击散布精度和寿命，要求枪管线膛有较小的粗糙度。但若要求Ra小于0.2，制造就很难达到，而且不经济。

铬有很好的特性：化学稳定性高，熔点较高，硬度高，摩擦系数小，因此它有很好的耐蚀性、耐热性和耐磨性。线膛镀上一层铬，能有效地延长枪管的寿命。对于轻、重机枪和大口径机枪，由于它们的实际射速高，温度高，一般需镀较厚的铬层。

此外，对线膛还有直线度要求，通常用长样柱进行检验。例如对7.62mm枪管，先用不同径向尺寸、工作长度为70mm的短样柱将其直径分组，然后按组选用工作长度为300mm的长样柱进行检验。此时应置枪管于垂直位置，借样柱自重能自由通过枪膛者为直线度合格（当阳径小于7.633mm时，直径为7.587mm的长样柱应通过）。

（二）弹膛的结构与技术要求

弹膛通常是由2～5个锥体(包括线膛与弹膛的连接部分——坡膛在内)组成。锥体的数目取决于枪弹的结构。以弹壳口部定位的59式枪弹，弹膛为两个锥体如图6-1（a）；51式、56式7.62mm枪弹，弹膛为四个锥体如图6-1（b）；53式7.62mm、54式12.7mm和56式14.5mm枪弹，弹膛均为五个锥体如图6-1（c）。

几种制式武器弹膛的技术要求如表6-2所示。

从表6-2可以看出：

（1）弹膛的径向尺寸精度要求较严，介于IT8～11级之间，常在IT9～10级之间，其公差均为0.05mm。

（2）弹膛的轴向尺寸多为未注公差尺寸，按IT14级加工。

（3）弹膛的表面粗糙度通常为Ra0.8～0.1，多数为Ra0.2。

（4）弹膛与线膛的同轴度为ϕ0.1mm。

（5）弹膛径向镀铬层厚度一般为0.01～0.06mm。

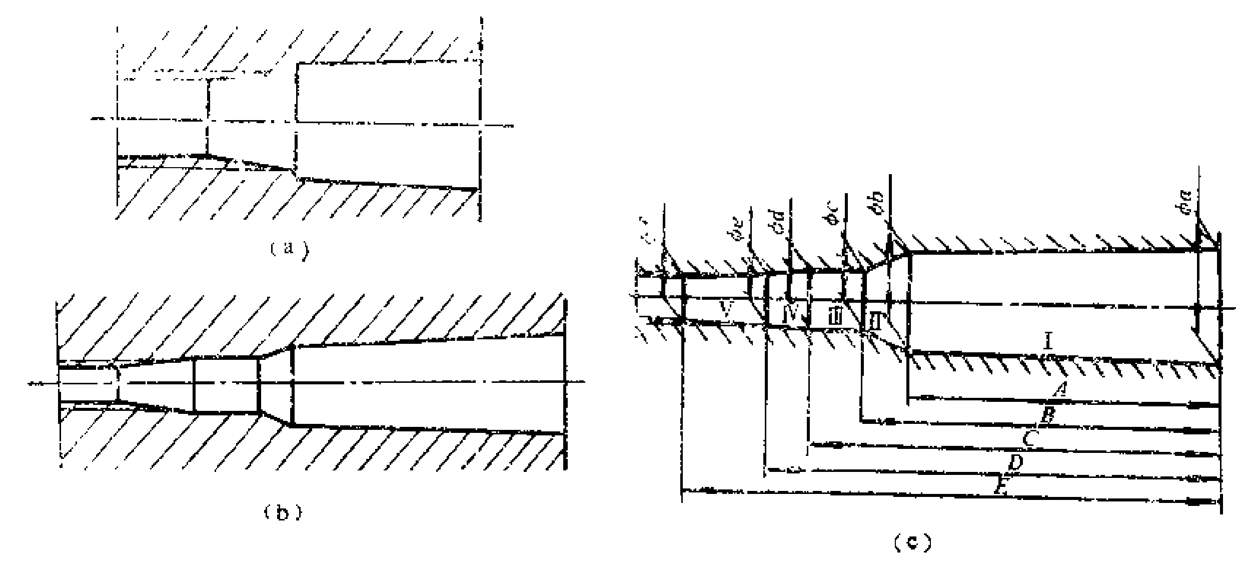


图6-1 弹膛的结构

(a) 两个锥体　(b) 四个锥体　(c) 五个锥体

表6-2 弹膛的技术要求(参阅图6-1)

枪种 尺寸及要求	59式手枪	54式冲锋枪	56式冲锋枪	57式重机枪	54式12.7mm 高射机枪	56式14.5mm 高射机枪
A	$14.4^{+0.12}_{0}$	15.6	27.2	38.1	78.25	$81.4^{0}_{-0.05}$
B	—	17.4	29.5	42.672	86.25	$92.3^{0}_{-0.05}$
C	—	21.5	37.7	52.07	103	107
D	—	—	—	55.118	113	110
E	22.4	27	45.7	73.152	133	126.7
ϕa	$10.065^{+0.056}_{0}$	$9.92^{+0.05}_{0}$	$11.35^{+0.05}_{0}$	$12.484^{+0.051}_{0}$	$21.89^{+0.05}_{0}$	$27.065^{+0.05}_{0}$
ϕb	$10.01^{+0.055}_{0}$ $9.42^{+0.055}_{0}$	$9.9^{+0.05}_{0}$	$10.12^{+0.05}_{0}$	$11.684^{+0.051}_{0}$	$19.23^{+0.05}_{0}$	$25.8^{+0.03}_{0}$
ϕc	—	$8.48^{+0.05}_{0}$	$8.74^{+0.05}_{0}$	$8.611^{+0.051}_{0}$	$14.08^{+0.05}_{0}$	$16.75^{+0.05}_{0}$
ϕd	—	$8.4^{+0.05}_{0}$	$8.6^{+0.05}_{0}$	$8.560^{+0.051}_{0}$	$13.91^{+0.05}_{0}$	$16.55^{+0.05}_{0}$
ϕe	—	—	—	$7.925^{+0.052}_{0}$	$13^{+0.1}_{0}$	$15.95^{+0.2}_{0}$
ϕf	$9^{+0.04}_{0}$	$7.62^{+0.065}_{0}$	$7.62^{+0.06}_{0}$	$7.62^{+0.06}_{0}$	$12.66^{+0.06}_{0}$	$14.5^{+0.07}_{0}$
表面粗糙度 Ra 值μm	大锥0.4 前锥0.8	一锥0.8～0.2 其余1.6	一，三锥0.2 二，四锥0.4	0.1	0.8～0.2	0.2
对线膛的同轴度	φ0.09	—	φ0.1	用样柱检验	φ0.088	—
径向镀铬层厚度	一面厚≥0.01	要镀铬	≥0.01	0.03～0.06	—	0.01～0.04

弹膛径向公差的确定，首先要考虑满足使用要求，然后才考虑生产经济性。枪弹与弹膛的配合，一定要有间隙，以利于枪弹顺利进膛，特别是当弹膛或枪弹上有油污和灰尘时，间隙便显得更加重要。但间隙不能太大，否则不能保证闭气，或导致弹壳纵向破裂。一般要求间隙在0.05～0.25mm之间（最大情况下不超过0.4mm），即制造公差为0.2mm。弹膛是切削加工出来的，最后工序是铰削，可以得到较高的精度，其经济精度为IT7～9级，在弹膛尺寸范围内，其公差为0.015～0.052mm。而弹壳是冲压加工出来的，由于模具有制造公差，在工作中还要磨损，形成弹壳本身时存在有弹性回跳，不易得到较高的精度，因此，若对弹膛与弹壳均分制造公差（各0.1mm）是不合理的。根据工艺等价原则，应缩小弹膛的制造公差，增大弹壳的制造公差。所以，弹膛的公差一般均定为0.05mm，而弹壳的公差定为0.06～0.15mm。

弹膛的轴向尺寸精度，对大多数自动武器来说，按未注公差尺寸加工，即公差较宽，这主要是因为闭锁间隙的精度是靠对枪机先选配、后修锉的方法来保证的。对于56式14.5mm高射机枪因采用螺纹扣合闭锁，且机头与弹壳底部相配合的“T”形槽不好修锉，同时一挺装配好的枪身需由一个机头与三根枪管相配，为了易于选配和保证闭锁间隙的一致性，故对弹膛斜肩部的轴向尺寸提出了较高的要求。

弹膛的表面粗糙度影响抽壳阻力、耐磨性和耐蚀性，一般要求具有较小的粗糙度。

弹膛各锥体要同轴，弹膛与线膛要同轴，若第一、二锥体不同轴，会使抽壳困难，第三、四（五）锥体不同轴以及弹膛与线膛不同轴均将影响射击散布精度。

弹膛的工作条件与线膛不完全相同。弹膛镀铬的目的主要是为了防蚀，同时还可以降低摩擦系数，增强耐磨性。所以其上镀铬层的厚度较薄。

二、枪管外表面的结构与技术要求

枪管外表面包括外圆表面和前、后端面。对绝大部分枪管来说，外圆表面为旋转表面，通常是阶梯圆柱面和圆锥面，仅在某些手枪及旧式武器中枪管才为非旋转表面。外圆表面为旋转表面的枪管有较好的工艺性。枪管外表面有配合表面和非配合表面。配合表面一般按IT8～10级制造。对于过盈配合表面，如与准星座、表尺座、导气箍等配合表面，为了提高生产经济性，先将其制造公差放大，按IT7～9级制造，然后分组，按组进行装配，以保证配合精度。这些配合表面其粗糙度常为$Ra0.8$。枪管与机匣的联接有固定联接（螺纹、过盈配合）和可换联接（楔闩、断隔螺纹、凸耳等）。螺纹联接常有螺纹起点要求，即枪管拧入机匣到位时，枪管上的螺纹起(或终)点与机匣上的螺纹终(或起)点恰好重合。采用与接套（机匣）压装的枪管以及采用套筒箍紧的枪管（例如14.5mm枪管），其配合处的尺寸精度、形状精度（圆度和圆柱度）均要求比较高，且表面粗糙度要求比较小。对于非配合表面，一般按IT14级加工。对于某些单人使用的武器，为了美观和防腐，常对其非配合表面进行抛光，其表面粗糙度约为$Ra0.8$。

枪管的外圆要求与其内膛同轴。若不同轴（即存在有壁厚差），且其数值较大时，将对枪管产生不良的影响：使枪管的强度降低；枪管上的装配件（如瞄准装置）对枪膛轴线产生偏移；或枪管热膨胀不均匀而产生弯曲，使枪管的强度、射击散布精度降低。所以，对配合表面，口径为7.62mm的壁厚差一般允许为0.1～0.2mm；口径为12.7～14.5mm的壁厚差允许为0.5mm；对非配合表面，允许的壁厚差数值可以大一些，但应小于上述数值的二倍。

枪口部的结构如图6-2所示。图6-2（a）和（b）常用于手枪、步枪和冲锋枪，图6-2

（c）和（d）用于带有膛口装置的枪管。在线膛和枪口端面之间，有一个平缓的过渡圆弧或圆锥面，以保护线膛末端不被碰伤。要求枪口端面与线膛垂直，过渡圆弧或圆锥面与线膛同轴，以保证弹丸出膛口时运动方向的正确性。这些要求是通过样板来进行检验的。枪口部的表面粗糙度不大于$Ra1.6$。

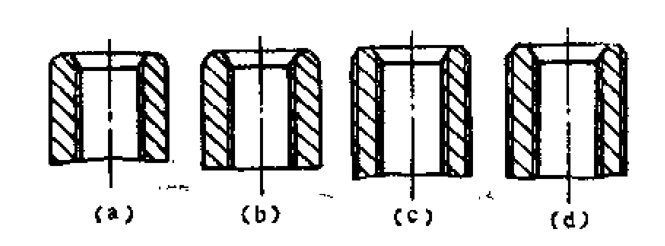


图6-2 枪口部的结构

（a）圆弧形面；（b）锥面-弧面；（c）弧面-平面-锥面；（d）锥面-平面-锥面

枪管尾端面常有容纳拉壳钩、推弹凸笋等的凹槽。它们相对于枪管周向定位凸起或定位卡槽、螺纹起点等有相对位置要求。枪管尾端面应平整，且与枪膛垂直，表面粗糙度一般为$Ra1.6$。

枪管材料的硬度为2290～3680N/mm²，是经过调质处理得到的，为索氏体组织，综合机械性能较好，同时也易于加工。

对于某些自动武器，枪管尾端还需进行局部热处理，以提高其硬度（HRC37～46），目的是：使枪管尾端面具有较高的撞击强度；使弹膛部分能取较小的安全系数，以利于缩小机匣的尺寸；补偿由于采用楔闩联接而引起枪管尾部强度的削弱。

第二节　枪管的材料和毛坯

一、枪管的工作条件及对材料的要求

自动武器的枪管在射击时工作条件非常恶劣，它承受着脉动的高压作用(一般压力为250～400MPa，作用时间在0.008s以内，每分钟作用500～1800次）、高温作用（火药燃烧温度约3000℃，内膛表面瞬时温度可达1000℃)、弹丸卡入膛线及在膛内运动时的高速挤压和摩擦作用、高压高温高速气流的冲刷作用和火药与击发药燃烧生成物的腐蚀作用。为了保证枪管在上述工作条件下能够正常工作并有足够的寿命，故对其材料有下列要求：

1．应具有足够的弹性和强度极限，以保证射击时在最大膛压的作用下，不产生残余变形或破坏。

2．应具有足够的冲击韧性和疲劳强度，以便在火药气体脉动高压的冲击作用下，特别是在火药气体压力超出正常而偶然突增的情况下（如装药量偶尔增多或弹丸在膛内运动突然受阻时），不产生脆性破坏，在脉动应力循环的作用下，不产生疲劳断裂。

3．应具有良好的耐热性、耐磨性和耐蚀性，以保证在高温下枪管材料的性能没有明显降低，且使枪管有较高的寿命。

二、选择材料的原则

选择材料时应遵循下列三条原则：

1. 材料应满足使用要求；

2. 材料应具有良好的工艺性；

3. 材料来源充足，成本低廉。

必须指出的是：对于军品，要突出使用要求，使用要求为第一，而其它要求次之；对于民品，选择时注意使用要求，但更注意工艺性和成本。

三、常用的枪管钢

根据枪管的工作条件对材料所提出的要求、选材原则和长期的使用经验，含碳量为0.5%左右的中碳结构钢经过热处理，可以满足膛压为300～330MPa、口径为7.62mm的步、机枪枪管的强度与韧性要求。所以，口径为7.62mm的步、机枪枪管的材料一般均用碳素结构钢，具体钢号是50BA。对于口径较大的枪管，则需采用合金结构钢。因为碳素钢与合金钢相比，有显著的不足：淬透性差（45钢的临界直径为ϕ16mm，而40Cr的临界直径为ϕ32mm）；屈强比低（碳素钢的σ_s/σ_b=0.5～0.7，而合金钢的σ_s/σ_b=0.8～0.9）；回火稳定性差（碳素钢在温度200℃以上时，硬度降低很快，而合金钢比碳素钢好）；在高、低温条件下，材料的机械性能、耐磨性、耐热性和耐蚀性，碳素钢均不及合金钢。

在钢中加入合金元素，可以提高钢的性能，但随着钢的强度的提高，钢的韧性下降，因此加入的合金元素要注意促使晶粒细化，改善基体韧性、细化粗大碳化物和减少回火脆性。

枪管用的合金结构钢其合金化的原则是：

中碳＋提高淬透性元素＋防止回火脆性元素＋阻止晶粒长大（细化晶粒）元素。

提高淬透性的元素：除钴以外的合金元素，均能增加钢的淬透性，常用元素有Cr、Mn、Ni、Si、B，用得最多的为Cr、Mn、B。

防止回火脆性的元素：Mo、W。

阻止晶粒长大的元素：V、Ti。

目前世界上许多国家均用Cr、Ni元素为主的合金钢系统，而我国由于资源的实际情况，开发了以Mn、Si、B元素为主的合金钢系统。

大口径枪管所用的材料，采用的是中碳、多元素低含量的合金钢。常用的钢号是：30CrNi2MoVA和30SiMn2MoVA，后者是前者的代用料。枪管钢属于轻武器专用钢，按冶金部专用技术标准（YB481—80)进行生产。

枪管用钢的化学成分及机械性能分别见表6-3和表6-4。

表6-3 枪管用钢的化学成分

钢号	化学成分%										
	C	Mn	Si	B	Ni	Cr	Mo	V	Ti	S	P
50BA	0.47～0.54	0.60～0.90	0.17～0.37	0.001～0.0035	—	—	—	—	≤0.05	≤0.030	≤0.035
30CrNi2MoVA	0.26～0.33	0.30～0.60	0.17～0.37	—	2.00～2.50	0.60～0.90	0.20～0.30	0.15～0.30	—	≤0.030	≤0.035
30SiMn2MoVA	0.27～0.33	1.60～1.85	0.40～0.60	—	—	—	0.40～0.60	0.15～0.25	—	≤0.030	≤0.035

从表6-3可知50BA中，含有微量元素B，B对淬透性影响很大，0.001～0.003% 的 B对

表6-4　枪管用钢的机械性能

钢　号	热处理		机械性能				
	淬　火	回　火	抗拉强度 σ_b MPa	屈服点 σ_s MPa	伸长率δ_{10} %	收缩率ψ %	冲击值α_k 10^5J/m²
			不		小	于	
50BA	840°C油淬	600°C 空冷	784～980	539	8	40	4.9
30CrNi2MoVA	860°C油淬	680°C水或油冷	882	784	10	40	8.82
30SiMn2MoVA	870°C油淬	650°C空或油冷	882	784	10	40	8.82

钢的淬透性的影响约相当于1.6%的Ni、0.3%Cr、0.2%的Mo、0.2～0.7%的 Mn、0.12%的V单独加入的作用。B仅对低、中碳钢提高淬透性有效，而对高碳钢完全无效。标准规定 B含量不超过0.0035%，过高不能相应地提高钢的淬透性，反而对钢的韧性产生不利的影响。根据实际使用经验，B的含量应控制在0.001～0.003%之间，若超过0.003%，则易产生B脆。

合金钢的性能比碳素钢优越，但它的生产复杂，成本高。为了有一个明确的比价概念，现以相同规格的各种热轧圆钢（ϕ29～ϕ50mm）为例加以说明，若以碳素钢的比价为1，则50 BA为1.49，30SiMn2 MoVA为2.6，30CrNi2MoVA为3.3。所以，选择材料时，既要满足使用要求，又要注意经济性，也就是说要正确使用合金钢。

轻武器专用钢与国家标准钢号相比较，其主要不同点是对前者提出了更严格的要求。轻武器专用钢品质好，属于高级优质钢；在检验时，须按规定数量取样，检查项目多（例如化学成分、机械性能、低倍组织、断口、非金属夹杂物、晶粒度、淬透性等等），各个项目要求严。例如化学成分允许偏差小，硫磷含量要求少；非金属夹杂物（氧化物、硫化物等）限制严，低倍组织要求严（在横向酸浸试片上不得有肉眼可见的残余缩管、气泡、裂纹、非金属夹杂物、点状偏析及白点；一般疏松、中心疏松、偏析必须合乎要求的级别）等等。所有这些检验项目与要求都是为了保证钢的质量，保证钢的静强度，特别是保证钢的断裂韧性、冲击韧性、疲劳强度以及防止钢的低温脆性破坏和失效裂纹源等所必需的，是保证武器在特殊工件条件下的使用要求和足够的寿命，故轻武器用钢应按专用标准生产与验收。

四、枪管用的毛坯

根据不同的枪管结构，采用不同的毛坯。常用的枪管毛坯有三种：

1．型钢或无缝钢管　对于沿枪管轴向没有较大直径变化的枪管，通常采用热轧圆钢作为毛坯。例如53式、57式重机枪，53式、56式、58式轻机枪，54式大口径机枪等的枪管均是采用这种毛坯，有的厂家生产56式冲锋枪管时采用无缝钢管作毛坯。

2．镦锻毛坯　对于存在有局部粗大的枪管，为了节约材料与加工工时，可选用圆钢将其局部镦粗，作为枪管的毛坯，这就是镦锻毛坯。例如56式半自动步枪、56式冲锋枪和56式大口径机枪枪管所用的毛坯。

3．模锻毛坯　对于枪管较短、其上有较大凸起，且生产量比较大的手枪枪管常用这种毛坯。

各种枪管毛坯在转入机械加工以前均需进行正常化处理；合金钢枪管一般在毛坯时进行最终热处理。

第三节 枪管的制造过程

一、枪管制造的特点

在自动武器制造中，枪管制造最具有特征性。其一，具有长径比特别大($l/d \geqslant 25 \sim 130$)、内孔形状复杂、质量要求高的深孔加工；其二，属于工件细长、刚度不足、要求外圆与内孔同轴的厚壁阶梯管件加工。

枪管制造是自动武器制造中一件复杂而繁重的工作，概括起来就是工艺特殊，加工复杂。具体表现是：

1．需要较多的专用设备、工艺装备和专门工种的技术工人。

2．加工中需要划分加工阶段，贯彻互为基准、逐渐提高精度的原则，采用工序分散的方法，以保证枪管的加工质量，因此，枪管加工有明显的规律性，且工艺路线长，加工工序多（有的枪管加工有100多道工序）。

3．在制造过程中涉及的工艺种类较多，例如有热加工、切削加工、压力加工、化学与电化学加工等。需要各种工艺适当地配合。

4．深孔加工，刚度不足，既限制生产率，又影响加工质量；为确保加工质量，在基本工序之间需要安排大量的非基本工序，这又影响了生产率，所以，枪管制造的生产率是不高的。

二、枪管制造中工序的种类

在枪管制造中，包括了许多工序。其中一部分是主要的，常称为基本工序，另一部分是次要的，常称为非基本工序。为了便于理解和掌握枪管的制造过程，按照各个工序的性质与作用，将其细分为四类：

1．基本工序　它是改变枪管尺寸、形状和金属物理机械性能等有关的一些工序。例如枪管内外表面的机械加工、热处理、表面处理、电化学加工等工序。此类工序在枪管制造的工艺过程中起决定性作用。

2．辅助工序　它包括：

（1）为保证正确地完成基本工序而进行的准备工序和终结工序。例如在钻深孔以前的毛坯校直、切端面和打中心孔；挤线前的按硬度分组、去油、着铜或着铜并镀铅，挤线后的去应力回火、去铜或去铅去铜；镀铬和氧化或磷化前后的一些工序等。

（2）炉号转移工序。枪管毛坯必须按熔炼炉号打上印记。为了使炉号印记不在加工过程中被切去，因此需要转移炉号工序。打炉号印记的目的有三：其一，掌握每一炉号材料的具体化学成份，以便按炉号制订或调整热处理规程；其二，当生产中发现某个炉号材料有质量问题时，便可使整个炉号枪管停止生产，以保证质量和防止进一步造成浪费；其三，在武器使用过程中若发生重大问题（如枪管在射击中破裂），可按炉号印记查找材料上的原因或对同一炉号的枪管进行适当处理。

（3）为便于在制品的短期贮存而设置的擦拭内膛、涂油防锈等工序。

3．修整工序　它是带修理性和校正性的工序。它包括钻孔或铰孔后尺寸过小或粗糙度过大而进行的补充铰孔；阳线表面不平整而进行的光冲头拉光；螺纹加工中用板牙修整与规正；热处理硬度不够的重复热处理；镀铬尺寸过小或存在局部严重疵病的退铬重镀；枪管弯曲的校直等。

4. 检验和试验工序　为了保证加工质量，在一些重要工序之后（或前后）、在加工阶段转换之间、在加工全部完成之后，均应安排检验工序，在镀铬之后要进行高压弹试验，以检验枪管的强度及铬层的质量，然后用磁力探伤仪进行有无裂纹的检查。

在设计枪管的工艺规程时，首先要合理地确定基本工序的位置，然后根据基本工序和实际生产的需要，设置若干辅助工序、修整工序、检验和试验工序，并将其插入基本工序之间，便形成了枪管制造工艺规程。

三、枪管的制造过程

枪管生产已有很长的历史。各类枪管的制造所用的加工方法、设备、刀具和夹具基本上是相同的。枪管加工工序顺序的安排有着共同的规律。枪管的制造工艺及其过程在相当程度上已经定型化了。但是，随着生产的不断发展，新工艺、新技术的不断涌现和应用，对枪管的制造过程引起了很大程度的变化。若各类枪管的制造采用相同的加工方法与技术时，其加工工序的顺序安排仍然是大致相同的。

枪管制造中机械加工工艺最为主要，它是枪管制造的主体。机械加工由内膛加工和外表面加工所组成。内膛加工是基础，它是工艺过程中最具有特征性和最专门化的加工。内膛加工又分为线膛加工和弹膛加工两个部分，具体加工有光膛加工、形成膛线和弹膛加工三个基本阶段。

枪管径向设计基准为枪管轴线；轴向设计基准为枪管尾端面或尾部限位凸肩；周向设计基准为定向凸起（或定位板槽）或螺纹起点、卡笋槽等。为了易于保证加工精度，在加工过程中，一般均应采用基准重合的原则，即选这些设计基准为定位基准。

枪管内膛技术要求较高，加工比较困难，而且在加工中容易产生废品，特别是钻深孔时常常发生走偏，致使外表面的加工余量不够而使工件报废。根据易出废品的工序应安排在开始阶段进行加工的原则，故枪管内膛的加工应先于枪管外表面的加工。

为了保证枪管的强度、射击散布精度以及装配要求，要求枪管外圆与内膛同轴。内膛要求高，根据先主后次的原则，首先应该加工内膛。为了保证同轴度要求，还必须按照互为基准、反复加工、逐渐提高精度的原则来处理内膛加工与外圆加工之间的关系，所以，内膛的加工与外圆加工应交替进行。

形成膛线的方法有多种。采用不同的形成膛线的方法，对枪管加工工序的性质、多少及其顺序安排有较大的影响。例如采用挤线法，它要求外圆为圆柱形，故外圆的阶梯车削应安排在挤线之后进行，而采用拉线法，则枪管外圆可先车削成台阶形，拉线工序一般放在机械加工的末尾。

弹膛与线膛要求同轴，线膛是弹膛的设计基准，因此加工弹膛时应取线膛为定位基准。故弹膛加工应在线膛加工之后进行。

枪管内膛和外圆加工均包含了几个粗精加工工序。为了保证加工质量，各粗精加工工序之间的关系应该是：枪管外圆和弹膛的粗加工，安排在光膛粗加工之后；外圆和弹膛的精加工，安排在线膛精加工之后。

下面对枪管的制造过程作进一步的介绍。

1. 光膛加工　它是枪管加工及内膛加工的第一阶段，先在实心枪管毛坯上粗加工（钻与粗铰）出内孔，其次是车外圆，然后再精加工（精铰或电解加工或挤光）内孔。加工方案常用的有三种：

（1）钻孔──→粗铰孔──→半精铰孔──→精铰孔；

（2）钻孔──→铰孔──→电解加工；

（3）钻孔──→铰孔──→挤光。

第一种是一种老方案，多采用低速铰削，它的生产率低，所需设备量大，不易得到较小的粗糙度，不能得到合理的切削痕迹，常需补充加工；第二种方案生产效率高，加工质量好，其中铰削常用高速，但电解加工工作条件较差，电解液对设备等有腐蚀性，且工件材质及其组织对加工质量有影响；第三种方案目前采用的是低速铰削，但由于采用了大余量(0.8～1mm）的挤光，故其生产效率高，能保证加工质量，这时热处理需放在挤光之后，以便挤线前枪管内膛具有足够的塑性。目前大口径多用第二种方案，小口径多用第三种方案。

2．形成膛线　它是内膛加工的第二阶段。形成膛线的方法有四种：

（1）拉线法　它是用钩形拉刀、梳形拉刀、螺旋或环形膛线拉刀拉过枪膛切下切屑的方法来形成膛线的。这种方法使用最早，它的生产率低（螺旋、环形膛线拉刀除外，但这类刀具制造比较困难），现已被其它方法所代替。目前仅用于弹道枪和新产品的研制中。

（2）挤线法　这种方法是二十年代末出现的。它是用挤线工具（冲头），在一定推力的作用下通过枪膛，使枪膛断面产生塑性变形而形成膛线的。这种方法生产效率高，质量好，但由于合金钢冲头寿命不高，影响其优越性的发挥。后改用硬质合金冲头，寿命很高，这一缺点便克服了。现在几乎所有枪管均采用挤线的方法来形成膛线。

（3）电解加工法　它是五十年代应用于生产的一种新工艺。是根据电化学原理按膛线形状电解枪管内膛而形成膛线的一种方法。电解时，电解液具有一定压力且不断流动，随时将反应生成物带走。这种方法的生产效率较高，加工质量好，但阴极制造复杂，效率与经济性不及挤线法，所以这种方法在枪上没有采用。由于小、中口径火炮炮管不宜用挤线法形成膛线，因而才广泛采用电解加工法。

（4）精锻法　它是五、六十年代开始应用于生产的一种新工艺方法，是利用管状毛坯和带有膛线凸起形状的芯棒，在径向精锻机上通过快速径向锻打，使毛坯内孔产生填满芯棒外形的塑性变形来形成膛线的。这种方法具有很高的生产率和很好的加工质量，同时还能节约枪管材料。在国外六十年代末已广泛应用于枪管膛线制造，目前已发展到使用一根芯棒在一个工序中锻出膛线、弹膛和外形。这种方法我国曾进行过研究和试验，也引进了少量设备，由于某些原因，还没有广泛应用起来。

3．弹膛的加工　它是枪管内膛加工的第三阶段，其加工方案通常是：

粗铰弹膛──→半精铰弹膛──→精铰弹膛──→抛光弹膛。

弹膛的粗铰、半精铰是在机床上进行的，而精铰则由手工来完成。这些工序在工艺过程中不是连续完成的，通常各工序安排原则是：粗铰在形成膛线之前；半精铰在形成膛线之后；精铰则在枪管机械加工的末尾、枪膛镀铬之前。这样安排的理由是：

（1）由于要求弹膛与线膛必须同轴，所以用刀具加工弹膛时应取线膛为径向定位基准。基准面越精确，同轴度就愈高，故半精铰应在形成膛线以后，而精铰应在全部机械加工的末尾。

（2）粗铰的加工余量大，切削力大，若刀具以精确的线膛表面作径向定位基准，则容易损坏精确的枪膛表面，故粗铰应放在形成膛线之前进行。

（3）枪管尾端面是弹膛和某些枪管外表面的轴向设计基准。在枪管外部的加工工序中，常用弹膛表面和枪管尾端面作定位基准。为了不使精确的弹膛表面在作定位基准过程中受到

损坏，应将弹膛的精加工安排在一系列外部加工之后进行。为了保证弹膛各锥体的轴向尺寸，需要取枪管尾端面作为刀具的定位基准。只有作为定位基准的尾端面加工好了，才能以它来定位精加工弹膛。而枪管尾端面的最后加工是在一系列外部加工之后进行的，所以弹膛的精加工安排在枪管机械加工的末尾。

（4）抛光弹膛的目的是为了减小弹膛表面粗糙度，所以安排在弹膛精加工之后、镀铬之前进行。镀铬前抛光弹膛是为了提高镀层表面质量和镀层对基体的附着力；某些枪管弹膛镀铬后仍需要抛光，以消减镀层较大颗粒，缩小粗糙度，减少摩擦，使之便于抽壳。

4．枪管外部的加工　它包括外圆、尾端面、枪口部和联接螺纹等四个部分的加工，每个部分均包含若干个工序。

枪管外圆的加工由粗车、半精车（或精车）和磨削等工序组成。粗车一般安排在钻深孔、粗铰深孔之后和热处理之前进行；半精车一般安排在挤膛线工序之后；精车视需要进行，而磨削均安排在后面一些，以减少已磨削部位在加工过程中的碰伤。

枪管尾端面的加工包括粗切端面、精切端面以及尾端面上凹槽的加工。一般粗切安排在粗铰弹膛之前，精切安排在半精铰弹膛之前。

枪口部的加工包括粗切、精切和成形加工。粗切、精切分别在尾端面的粗、精加工之后，成形加工则在尾端面最后一次车削与线膛抛光之后，这样既能保证枪管的长度，又能保证枪口端面对线膛严格的垂直度。

连接螺纹（主要指枪管尾部螺纹）的加工，其定位基准是弹膛表面和枪管尾端面，为了定位时不损坏精确的弹膛表面以及减少螺纹在以后加工过程中的碰伤，通常将连接螺纹的加工安排在半精铰弹膛、尾端面和外圆精加工之后。

5．枪管的热处理　它包括正常化、整体热处理（淬火与高温回火）、局部热处理（淬火与中温回火），去应力回火（在挤线后或校直后）、定性回火（镀铬后）等几种。不是所有的枪管均需进行这几种热处理，但一般均要进行第一和第二种热处理。有关热处理工序的安排见第五章及本章第十节。

6．表面处理　这里指的是氧化（或磷化）和镀铬。它们均安排在工艺过程的末尾，而镀铬则在氧化（或磷化）之前进行。

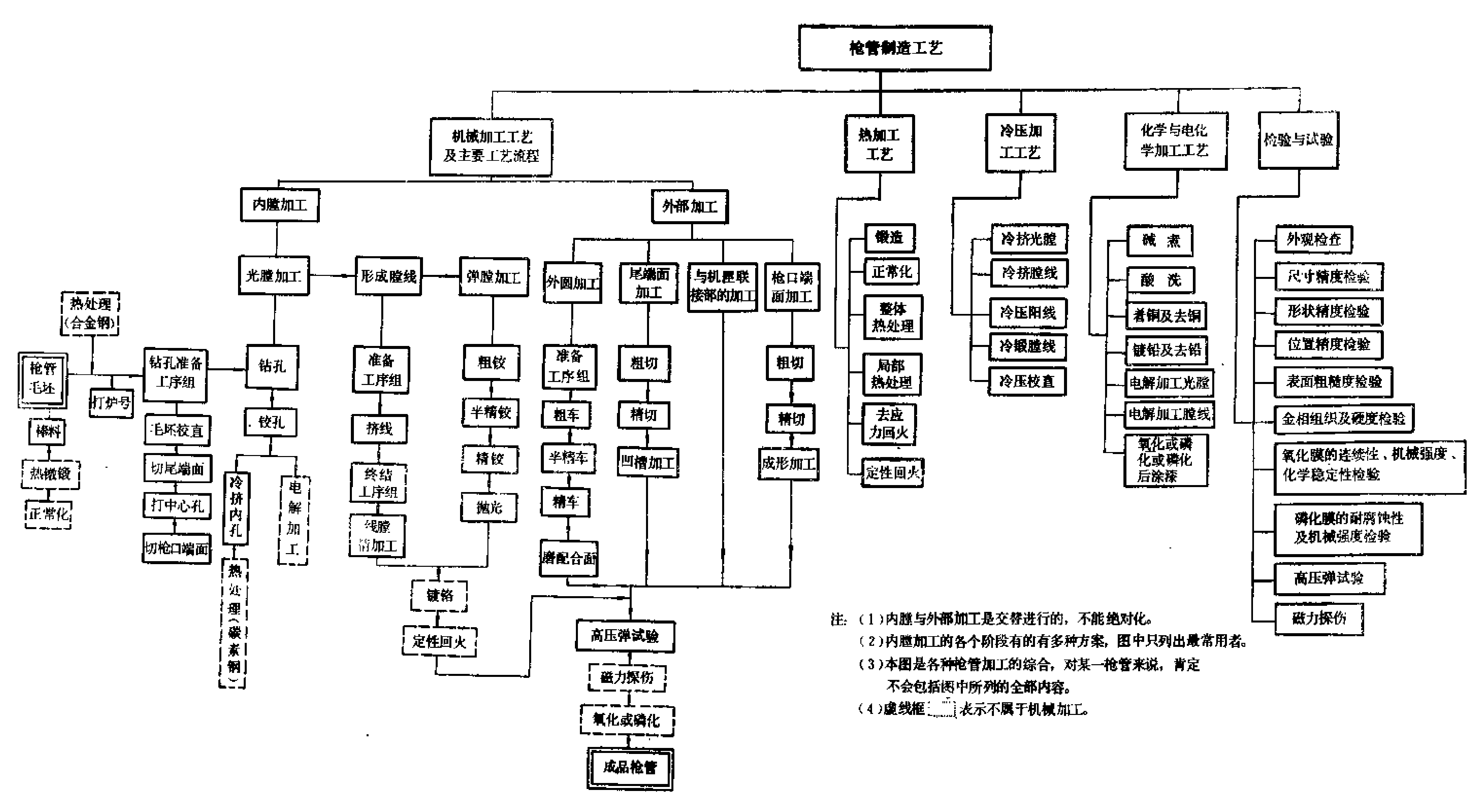
下面以56式7.62mm冲锋枪枪管(50BA)和56式14.5mm高射机枪枪管(30SiMn2MoVA)为例说明枪管的制造过程。

56式7.62mm冲锋枪枪管的主要工艺路线：

毛坯校直、切端面、打中心孔⟶钻深孔⟶铰深孔⟶切两端面⟶粗车外圆⟶第一次铰弹膛(1、2锥)⟶冷挤孔⟶热处理⟶挤线⟶第一次切尾端面⟶第二次铰弹膛⟶外圆半精及精加工（车、磨工序）⟶第二次切尾端面⟶第三次铰弹膛⟶抛光线膛⟶第三次切尾端面⟶切枪口端面⟶粗、精锪枪口⟶光冲拉阳线⟶铣螺纹⟶手铰弹膛及抛光⟶抛光枪口⟶按线膛尺寸分组并镀铬⟶高压弹试验⟶磁力探伤。

56式14.5mm高射机枪枪管的主要工艺路线：

毛坯热处理⟶校直⟶去应力回火⟶钻深孔⟶粗车外圆⟶高速铰深孔⟶磨枪管尾部及口部外圆⟶电解加工内孔⟶挤线⟶去应力回火⟶外圆粗、精加工⟶磁力探伤⟶红套枪管套筒⟶切尾端面⟶粗铰弹膛及精铰3、4锥⟶线膛镀铬⟶定性回火⟶车螺纹⟶半精铰弹膛⟶精铰弹膛⟶抛光弹膛⟶弹膛镀铬⟶抛光弹膛⟶铣特



注：（1）内膛与外部加工是交替进行的，不能绝对化。
（2）内膛加工的各个阶段有的有多种方案，图中只列出最常用者。
（3）本图是各种枪管加工的综合，对某一枪管来说，肯定不会包括图中所列的全部内容。
（4）虚线框 ⬚ 表示不属于机械加工。

图6-3　枪管制造工艺及工艺流程

制螺纹——>磷化……。

枪管制造工艺及工艺流程如图6-3所示。

第四节 枪管的深孔钻削

一、对深孔钻削工序所提出的要求

枪管制造中用的毛坯一般是实心的，要进行枪管内膛的加工，必须首先在实心毛坯上钻孔。钻孔工序是内膛加工过程中最复杂、最重要而又最艰巨的工序之一。尽管钻孔属于粗加工工序，但是，它是头道工序，对以后整个深孔加工过程有着先决的意义，对以后工序安排的合理性、生产率和孔的质量均有很大的影响，所以不能忽视。为了使所钻的孔符合整个工艺过程的要求，通常对钻孔这道工序有四点要求：

1．孔的轴线应具有一定的直线度；

2．孔的轴线应与毛坯的轴线具有一定的同轴度；

3．孔的截面和表面应具有一定的圆度和圆柱度；

4．孔的尺寸精度和表面粗糙度应达到对粗加工所提出的要求（尺寸精度IT12～14级，表面粗糙度$Ra=12.5\mu m$）。

二、深孔钻削的特点、困难及解决困难的措施

1．深孔钻削的特点

深孔钻削的特点，归纳起来有以下三点：

（1）孔的深径比大。深径比指的是钻孔深度与孔径之比，一般所谓深孔，这个比值等于或大于5～7，而在自动武器中这个比值为25～130，比一般深孔的比值大得多，因而不能用一般孔加工所用的刀具、设备和加工方法，而需采用特种刀具、专用设备和合理的钻削方式才能进行加工。

（2）在钻孔过程中，由于不能确切地保证对钻孔的四点要求，因此，常需增大加工余量，以使后续工序有足够的余量来消除钻孔中所产生的各项加工误差。

由于钻孔后孔有直线度、圆度和圆柱度误差，要消除这些误差，就要增大孔的加工余量。例如对孔径为5～15mm、精度为IT8～9级的孔，钻孔后的直径加工余量(即铰削余量)为0.2mm，而对枪管上的深孔则为0.5～1mm。

由于钻孔过程中会产生同轴度误差，也就是要发生孔的轴线走偏，为了能在加工外圆时纠正孔的走偏，就要增大毛坯外径，这时毛坯外径尺寸等于枪管外径成品尺寸加上加工余量和两倍钻头走偏量。

（3）进给量小，生产率低。

由于孔深，钻头（杆）的刚度低，不能承受大的切削力和扭转力矩；由于孔深，排屑通道小，距离长，阻力大，而为了便于排屑，切屑的刚度不能大，所以深孔钻削采用的进给量是很小的，仅为一般钻孔进给量的几分之一至十分之一，故生产率是很低的。

2．深孔钻削的困难

深孔钻削，特别是枪管类的深孔钻削，与一般钻孔相比，有其突出的困难。当用麻花钻钻深孔时，其突出的困难是：

（1）排屑困难　切屑不易从孔中排出，常阻塞在刀具与孔壁之间，致使刀具折断和发

生走偏，同时还使孔的表面粗糙度恶化，故刀具在钻削时应经常退出以进行排屑。

（2）冷却润滑困难　随着刀具的不断钻入，冷却润滑液很难达到切削刃，刀具受切屑的包围，散热差，温度高，耐用度降低，提高切削用量受到限制。

（3）刀具细长，强度、刚度不足，且钻头两切削刃很难保证对称，致使加工的孔产生走偏现象。

（4）不能观察刀具在孔中的工作情况，很难做到及时发现问题与处理问题，一旦发现问题，采取措施进行补救时，往往为时已晚，已造成质量问题或安全事故。

3．解决深孔钻削困难的措施

（1）改善钻头的结构　钻头应能连续供给冷却润滑液和连续排除切屑，钻头应具有良好的导向性，钻头结构本身应有纠正走偏的能力，在可能条件下应设法提高钻头的强度和刚度，使钻头能够克服深孔加工所带来的困难，满足深孔加工所提出的要求。

（2）改善机床的结构　机床应具有合理的运动系统、供油排屑系统、防止钻头因切削力矩突然增大而折断的装置以及自动停车装置等。

（3）供油系统应保证较高的油压和连续排除切屑所需的最小供油量。

（4）采用合理的切削用量　切屑的刚度和形状直接影响切屑的排出，而其刚度和形状与进给量、刀具结构和切削刃几何角度以及分屑器等有关，为了便于排屑，需要采用较小的进给量，这样，不仅切屑刚度低，而且能够得到有利于排屑的切屑形状——带折皱的波纹形的长带切屑，在较小进给量和保证刀具经济耐用度的条件下，应尽量采用大的切削速度。

三、深孔钻削的方式

钻孔和其它许多切削过程一样，需要有两种运动：主运动即切削运动（旋转运动）和辅助运动即进给运动。这两种运动可以全由刀具完成，也可以全由工件完成，或者由两者共同完成。由于完成这两种运动所取的方式不同，故钻削方式可分为以下四种：

1．工件回转，钻头送进；

2．钻头回转并送进，而工件不动；

3．工件回转并送进，而钻头不动；

4．工件回转，钻头反向回转并送进。

在上述四种方式中，若按主运动完成来分则只有两类：工件完成主运动类（方式1、3、4）和刀具完成主运动类（方式2）。主运动由工件完成或者由刀具完成，对所加工出来的孔来说，各具有不同的特点。现以麻花钻钻孔为例，说明如下：

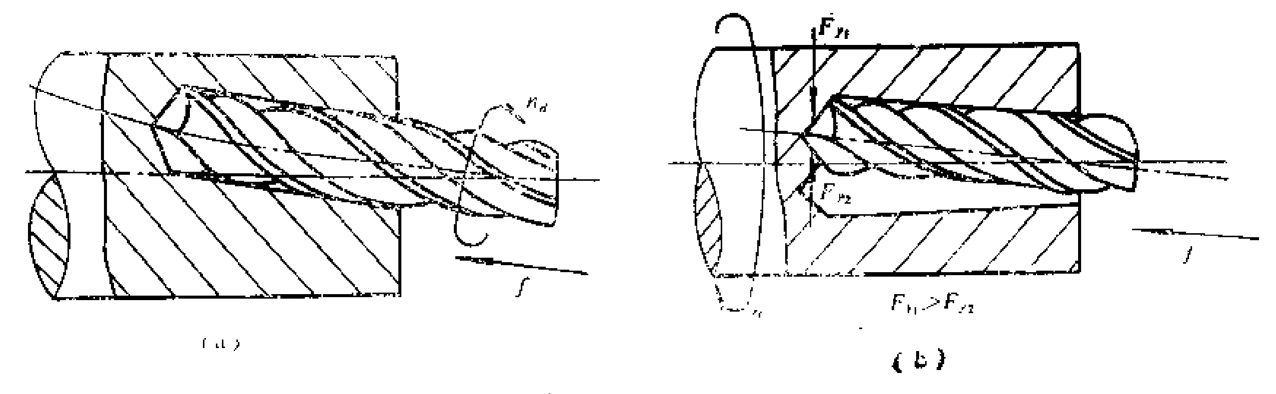


图6-5　麻花钻钻孔时完成主运动的两种方式

（a）刀具完成主运动　　（b）工件完成主运动

用麻花钻钻孔时，若主运动由刀具完成（如在普通立式钻床上钻孔），由于麻花钻是双刃钻头，制造和刃磨时双刃难以保证严格的对称，使用过程中双刃各自的钝化程度也不同，故两切削刃上的水平切削分力不可能完全相等；麻花钻有横刃，在开始接触工件时易偏移，且在加工过程中其轴向力大、刚度不足、导向性也较差；机床进给运动方向难以完全正确；工件材质不能完全均匀一致，等等。由于这些因素的影响，麻花钻钻孔时随时都有走偏的可能。若一旦发生了走偏，钻头将继续保持这个不正确的方向前进，钻孔越深，孔轴线的弯曲和走偏量也越大，但孔的直径没有显著变化，扩张量很小，如图6-4（a）所示。

若以工件完成主运动，且有某种因素使钻头偏离理论进给方向时，由于工件是回转着的，故刀具的走偏便反映为孔径的局部扩大，随着孔径的扩大，又产生了切削刃上受力不匀的现象；外刃负担着较大的切削面积，所以作用在外刃上的水平切削分力F_{y_1}大于作用在内刃上的水平切削分力F_{y_2}，从而促使其反回原位，因此起到了纠正走偏的作用。这时所加工出来的孔径有所扩大，孔径大于钻头直径，但孔的中心线是直的且与工件的轴心线重合，如图6-4（b）所示。

实践表明：工件作主运动使孔产生的扩张现象要比以钻头作主运动所产生的偏离值小得多，孔径扩大比偏离的误差在后续工序中更容易纠正。为了节约材料，保证生产率和提高经济性，故在枪、炮管钻孔时一般均采用工件完成主运动类。对于枪管上的钻孔，通常采用第一种钻削方式（工件回转、钻头送进），在某些多轴立式钻床上则采用第三种钻削方式；对于大型炮管有的采用第四种钻削方式。

四、深孔钻削用的刀具

（一）对深孔钻削所用刀具的要求

1. 钻头本身应有合理的几何形状和良好的导向，能消减钻头的走偏；
2. 钻头能顺利地和连续不断地引入切削液并排除切屑；
3. 所得加工表面质量高；
4. 生产率高，寿命长；
5. 制造容易，使用简便。

（二）深孔钻削所用刀具的类型及其适用范围

深孔钻削所用刀具的结构形式很多。按其切削刃数目的多少可分为单刃深孔钻和多刃深孔钻；按其排屑的方式来分则有外排屑深孔钻（枪钻、套料钻）和内排屑深孔钻（单刃和多刃深孔钻、BTA深孔钻、喷吸钻、套料钻）。

各种深孔钻的使用范围是根据被加工深孔的尺寸、精度、表面粗糙度、生产率、材料可加工性和机床条件等因素来确定的。外排屑深孔钻适用于加工ϕ2～20mm、长径比大于100、表面粗糙度Ra12.5～3.2、精度IT8～10级的深孔，生产率较内排屑深孔钻稍低。内排屑深孔钻适用于加工ϕ6～60mm、长径比为100以内、表面粗糙度Ra3.2以上、精度IT7～9级的深孔，生产率较高。喷吸钻适用于直径ϕ16～65mm，冷却液压力较低的场合，其它性能同内排屑深孔钻。套料钻（环孔钻）适用于孔径大于ϕ60mm的孔，可以节约材料，减少金属切削量，降低功率的消耗。

对于ϕ20mm以下的深孔，因孔小通常采用外排屑深孔钻。若采用内排屑，则因刀具和钻杆内孔很小，切屑很容易堵塞在孔内排不出来。对于ϕ20mm以上的深孔，广泛采用内排屑深孔钻，这时，由于切屑在排屑过程中不接触已加工孔壁，且排屑通畅，已加工表面不会被划伤，更

有利的是它能增大刀具和钻杆的直径，从而提高了刚度，保证了工作的平稳，使孔具有较高的直线度。

枪管孔径小于ϕ20mm，由于孔径小，常采用外排屑结构，且切削刃为单刃的，常称为单刃外排屑深孔钻，又叫枪管钻，这种钻头在下面将要详细研究，至于其它类型的钻头，这里仅对单刃内排屑深孔钻、喷吸钻和单管喷吸钻作一些介绍。

（三）单刃外排屑深孔钻

单刃外排屑深孔钻，由于它最早用于加工枪管，故常称枪管钻（枪钻）。其工作原理如图6-5所示。切削时切削液以油压$p>3$MPa的高压，由钻杆3后端打入钻杆内部，经月牙形孔4和切削部分的进油孔（小圆孔或月牙形孔）到达切削区，起冷却和润滑作用，并迫使切屑随同切削液由V形槽和工件孔壁间的空间排出。因切屑是在深孔钻的外部排出，故称外排屑。钻头的切削部分2只在一侧有切削刃，亦即切削刃在径向只有一条且分布在钻头轴线的一边，这就是常称的单刃钻头。这条切削刃上有一个钻尖，它与钻头的轴线不重合。钻尖又把这条切削刃分为内刃与外刃两个部分。

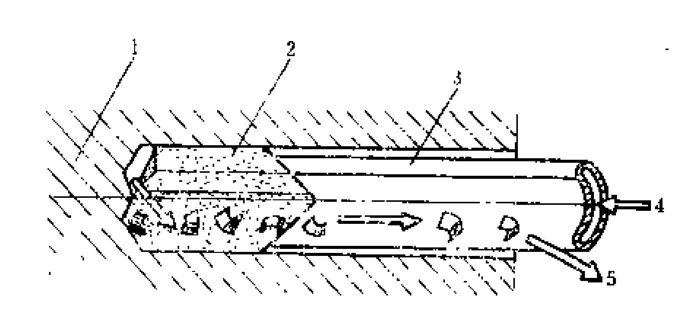


图6-5　单刃外排屑深孔钻的工作原理

1—工件；2—切削部分；3—钻杆；4—月牙形切削液入孔；5—出口

枪管钻由切削部分（刀头）和钻杆部分所组成如图6-6（a）。切削部分通常用高速钢制造；为了增加钻头的寿命和提高生产率，有的已采用整体硬质合金见图6-6（b）；为了节约硬质合金，对于直径大于ϕ6mm的钻头，可以采用镶焊硬质合金刀片结构见图6-6（c）。钻杆部分一般是用45、40Cr的无缝钢管经过辊轧将其压制带有V形槽而成。切削部分与钻杆用焊接使其构成一体。切削部分的进油孔有月牙形的，也有圆孔形的，前者具有较大的进油孔断面积，适用于直径小于ϕ17mm以下的钻头，后者的进油孔断面积相对较小，适用于直径大于ϕ17mm以上的钻头。由于圆形进油孔便于制造，所以目前在小直径的钻头上也已广泛使用这种进油孔结构。

切削部分的几何形状直接影响加工质量和工作情况，因为它们决定了钻头的受力和导向、切屑的形状和排出以及冷却和润滑的效果，从面影响孔的位置精度、形状精度、尺寸精度和表面粗糙度以及刀具的寿命和生产效率。

切削部分几何形状主要指的是内角、外角、钻尖位置、内刃对轴线的位置、排屑槽角和刃口角度等，现分述于后：

1．内角、外角及钻尖位置（图6-7）

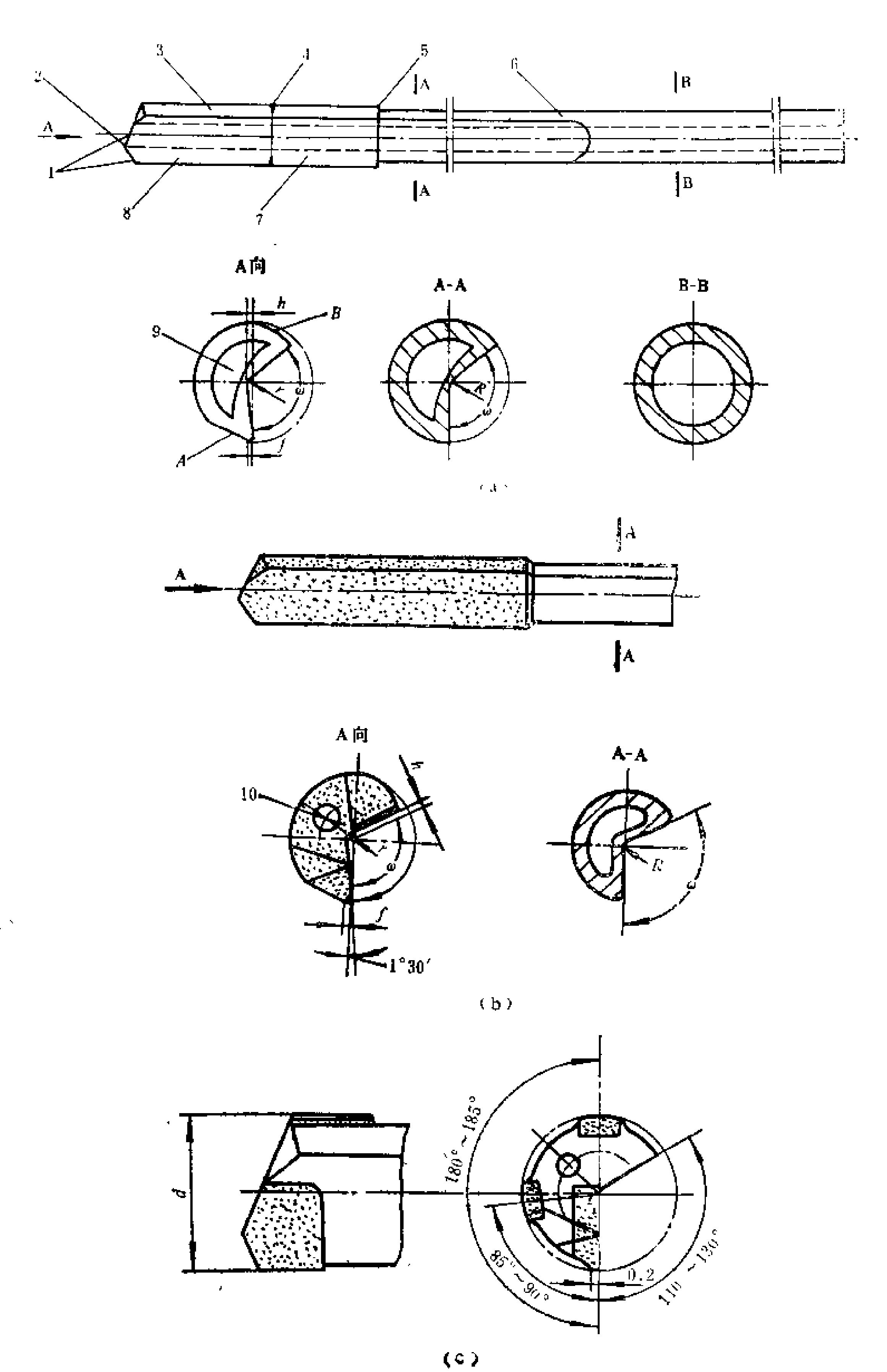


图6-6　三种枪管钻

(a)高速钢枪管钻；(b)硬质合金枪管钻；(c)镶焊硬质合金刀片枪管钻

1—切削刃；2—钻尖；3—钻头；4—刀头焊接处；5—刀头、钻杆焊接处；6—钻杆；7—50钢；8—高速钢；9—月牙形供油孔；10—圆形供油孔

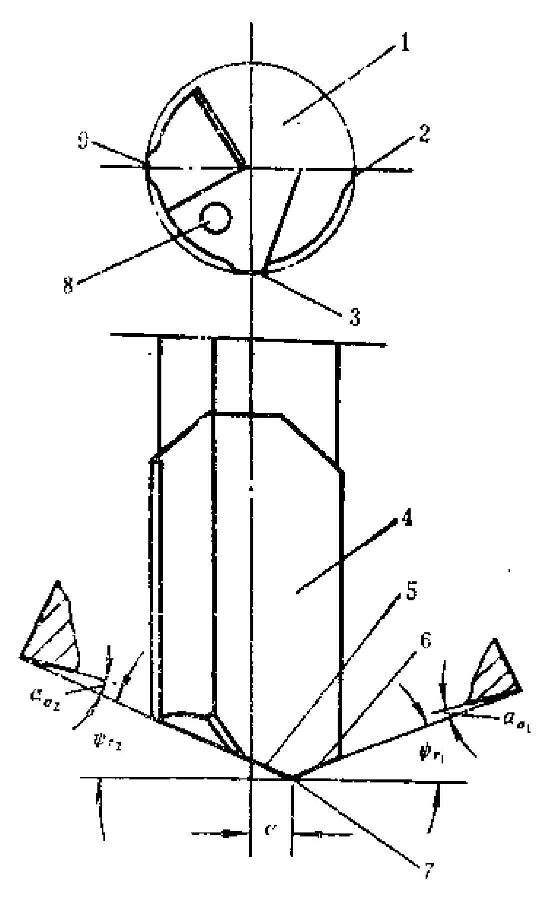


图6-7 切削部分要素

1—排屑槽；2—切削刃棱带；3—切削支承棱(条)；4—排屑槽；5—内刃；

6—外刃；7—钻尖；8—切削液孔；9—导向支承棱(条)

切削部分的外角ψ_{r_1}和内角ψ_{r_2}，分别相当于外刃6和内刃5的主偏角的余角，即余偏角($\psi_r = 90° - \kappa_r$)。两刃相交得钻尖7，它和钻头中心的偏距为e。ψ_{r_1}、ψ_{r_2}和e三者的合理数值应

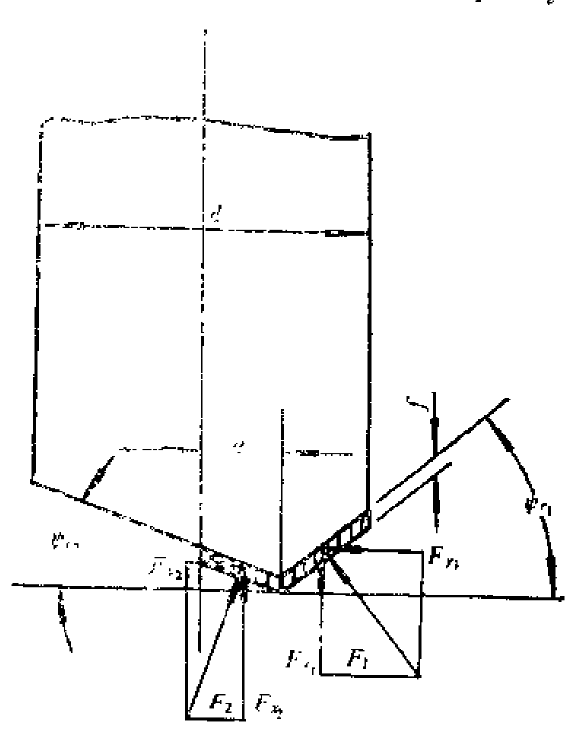


图6-8 ψ_{r_1}、ψ_{r_2}与e的关系

使钻孔时径向力（即水平分力）接近平衡，且有不大的合力指向切削部分的导向支承面上，如图6-8所示。

作用在外刃、内刃上的径向切削分力分别为

$$F_{y_1}=F_1\sin\psi_{r_1}=pf(d/2-e)\sin\psi_{r_1}$$

和

$$F_{y_2}=F_2\sin\psi_{r_2}=pfe\sin\psi_{r_2}$$

式中 F_1、F_2——分别为外刃和内刃上的法向切削力（N）；

f——进给量（mm/r）；

p——比切削力（单位面积切削力）（Pa）。

为使径向切削分力平衡，可令$F_{y_1}=F_{y_2}$，则

$$pfe\sin\psi_{r_2}=pf(d/2-e)\sin\psi_{r_2}$$

故

$$e=\frac{d\sin\psi_{r_2}}{2(\sin\psi_{r_1}+\sin\psi_{r_1})}$$

若$\psi_{r_1}=\psi_{r_2}$，则$e=d/4$；

若$\psi_{r_1}<\psi_{r_2}$，则$e<d/4$；

若$\psi_{r_1}>\psi_{r_2}$，则$e>d/4$。

通常取$e=d/(3\sim5)$，$\psi_{r_2}=20°$，$\psi_{r_1}=30°\sim40°$。

在实际加工中，由于很难使外刃、内刃上的径向切削分力完全平衡，这时，一般应使$F_{y_1}>F_{y_2}$，即使钻头上的支承面始终紧贴孔壁，以保证具有良好的导向性，且可以防止孔径的扩大。为达到此目的，在多数情况下取$e=d/4$，而使$\psi_{r_1}>\psi_{r_2}$。对于加工一般钢材，常取$\psi_{r_1}=30°\sim40°$，$\psi_{r_2}=20°$。但需指出的是：在枪管制造中，为了便于制造和刃磨，常取$\psi_{r_1}=\psi_{r_2}$，$e=d/4$。

由于钻尖与钻头的轴心线有偏距e，切削时内刃在孔底形成一个圆锥面（图6-9），这个圆锥面可起定心作用，使钻头不易偏离。

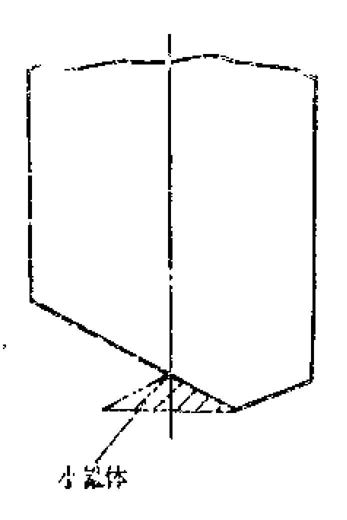


图6-9　内刃切削形成的小锥体

2．钻头内刃离轴线的距离h（图6-6）

钻头内刃近轴线处的前刀面应低于轴线一个距离h，以消除零切削速度，减小轴向阻力，改善切削条件，提高钻头寿命，同时在钻削过程中在孔的中心形成零位柱心（图6-10），它

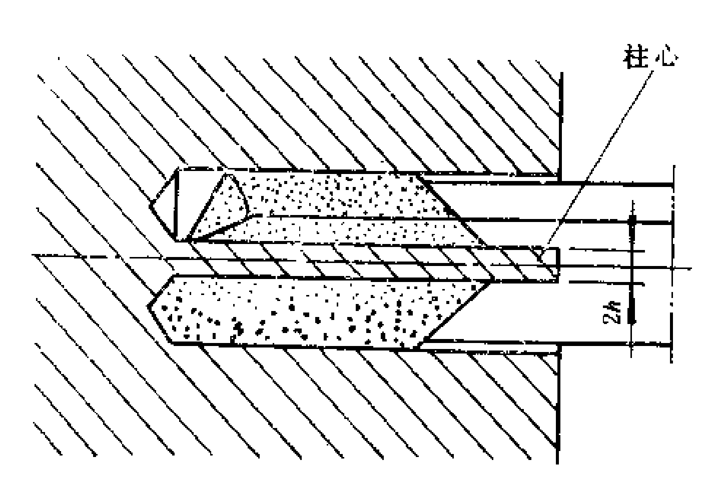


图6-10　零位柱心

可以改善钻头工作时的导向，从而减少走偏。为了使柱心能自行折断并顺利地随切屑排出，h不能太大，一般取$h=0.025d$。

3．前角γ和后角α

由于枪钻上γ和α的情况较复杂，在此不作深入细致的研究。为了便于制造和重磨，一般γ取0°，α取15°。由于外刃的工作与麻花钻相似，故α沿切刃是变化的；而内刃的工作与车刀相似，故α沿切刃是不变的。

4．倒锥和斜棱

为了减少钻头切削部分与孔壁的摩擦，使钻头与孔壁之间造成薄油膜润滑，一般钻头的定位支承圆柱部分具有（0.05～0.1）mm/100mm的倒锥。在切削部分，由排屑槽与圆柱部分所形成的一刃口，对孔壁有修光作用，为形成后角和减少与孔壁的摩擦，需制出斜棱，并形成一窄刃带，刃带宽$f=0.2\sim0.4$mm，以利于导向。对于直径小于15mm的钻头，要制出两个斜棱：校正斜棱A和背部斜棱B，见图6-6（a）。

5．排屑槽角ω

为了保证很好地排屑和钻头有足够的刚性，且制造简单，常取槽角为120°。过小不能保证生产率，在压制槽时会产生裂纹；太大则削弱钻杆刚度（当槽角为110°时，钻杆的扭转刚度只有轧制前圆管刚度的35%）。

（四）内排屑深孔钻

由于外排屑深孔钻的扭转刚度低，因此进给量很小，故生产率低。为了提高钻杆的刚度，使排屑顺利，且得到较好的被加工孔的质量，于是又产生了内排屑的深孔钻。

用内排屑深孔钻钻孔时，切削液沿钻杆和钻头的外表而与钻头钻出孔的孔壁之间所形成的间隙注入，经过切削区，迫使切屑经过钻杆中心的圆形孔道排出，故名内排屑，如图6-11所示。

内排屑深孔钻钻头一般用螺纹和钻杆连接，它适用于加工$\phi12\sim\phi120$mm、长径比小于100、加工精度为IT8～10级、表面粗糙度$Ra3.2$的孔，由于钻杆是圆管形的，刚性较好，且

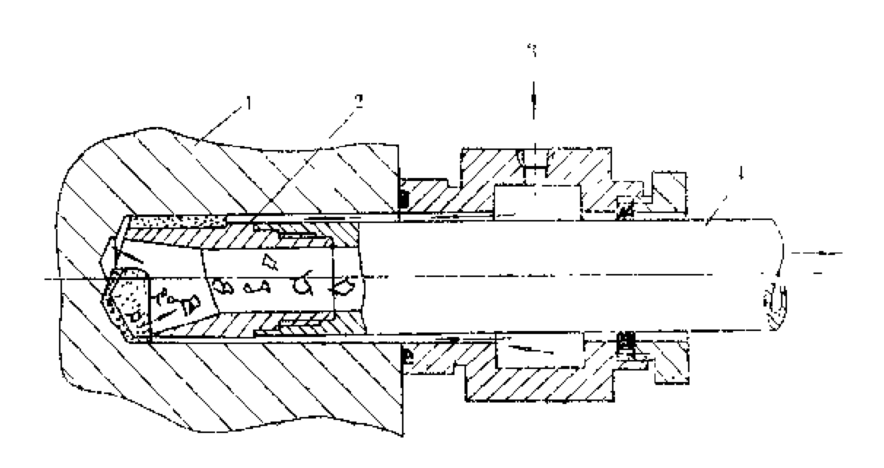
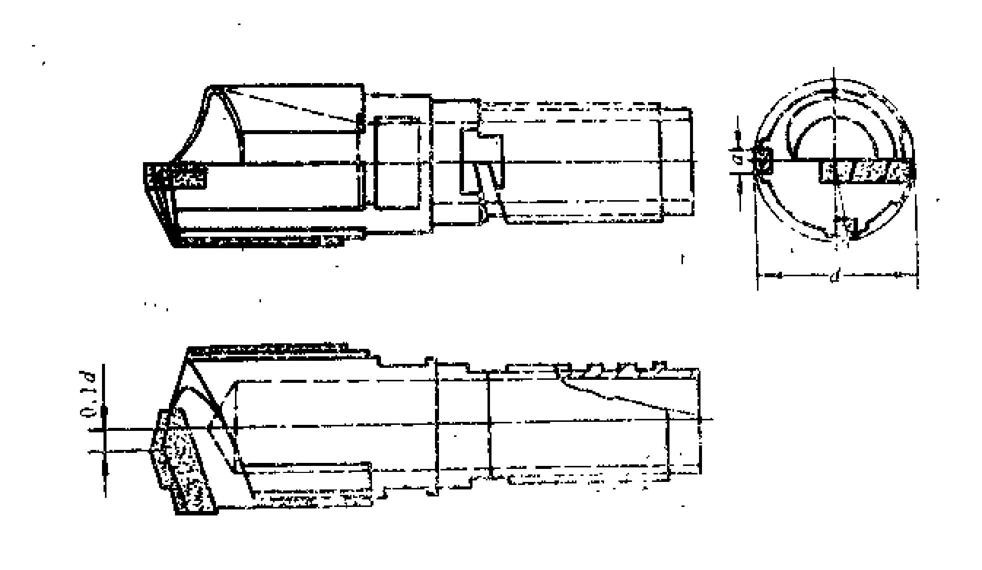


图6-11 内排屑深孔钻的工作原理
1—工件；2—钻头；3—泵入切削液；4—钻杆

切屑不与被加工孔壁发生摩擦，故生产率和加工质量均较外排屑稍高。

内排屑深孔钻的切削部分有单刃的，也有多刃的；有用高速钢制造的，也有用镶焊硬质合金的。图6-12所示为镶硬质合金的单刃内排屑深孔钻。钻头的切削部分镶有硬质合金，外刃磨成阶梯形，以使切屑分成碎块，在切削刃上有的磨有断屑台，使切屑折断。切屑经过排屑通路（由钻头前刀面处1/4圆周空间经中部斜孔至尾部中心孔）进入钻杆内部排出。切削部分镶有两根导条（支承导条和导向导条），并与刃口棱带形成三点定圆进行导向。工作部分的外圆上被切去三块，以便在钻孔时与孔壁形成一定空隙，让高压油由此空隙进入切削区。钻头的尾部用双头矩形螺纹与钻杆相连结。这种深孔钻主要用于小口径炮管的钻孔。



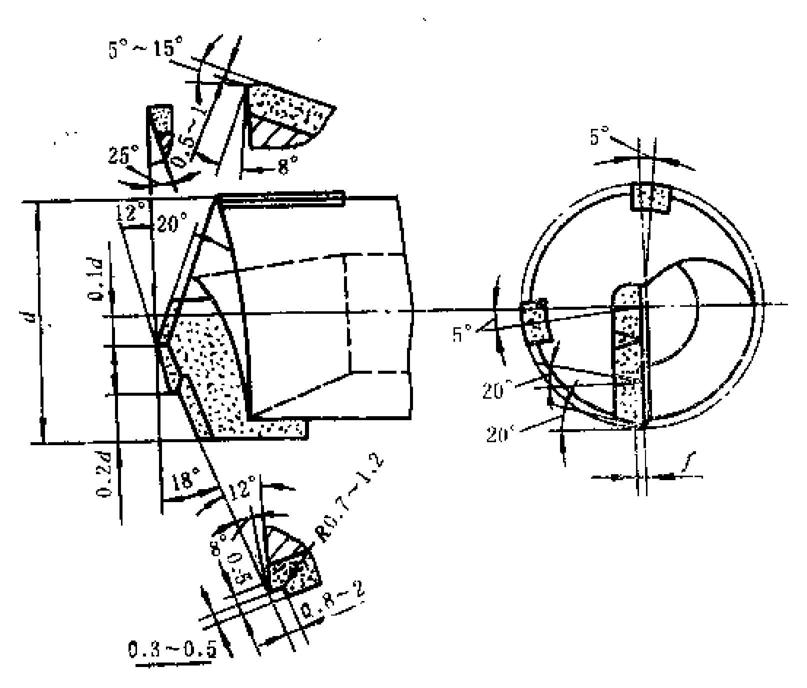


图6-12　单刃内排屑硬质合金深孔钻

从本世纪三、四十年代开始在西方出现了BTA深孔钻技术。所谓BTA（Boring and Trepanning Association）是国际钻镗套料加工协会的缩写。BTA深孔钻按其发展过程可分为三种：一种是单刃钻头，即BTA（Heller）深孔钻，另一种是错齿（多刃）钻头，即BTA（Sandvik）深孔钻，近年来又发展了一种喷吸式深孔钻（Ejector）。

下面仅对单刃内排屑BTA深孔钻作一简单介绍。

图6-13所示为ϕ12.95mm深孔钻头的典型结构。对于小直径（ϕ6～16mm）深孔钻常选用"T"型刀片，直接焊接在钻杆上已加工出的刀片槽内。钻头以"三点定圆"进行导向。

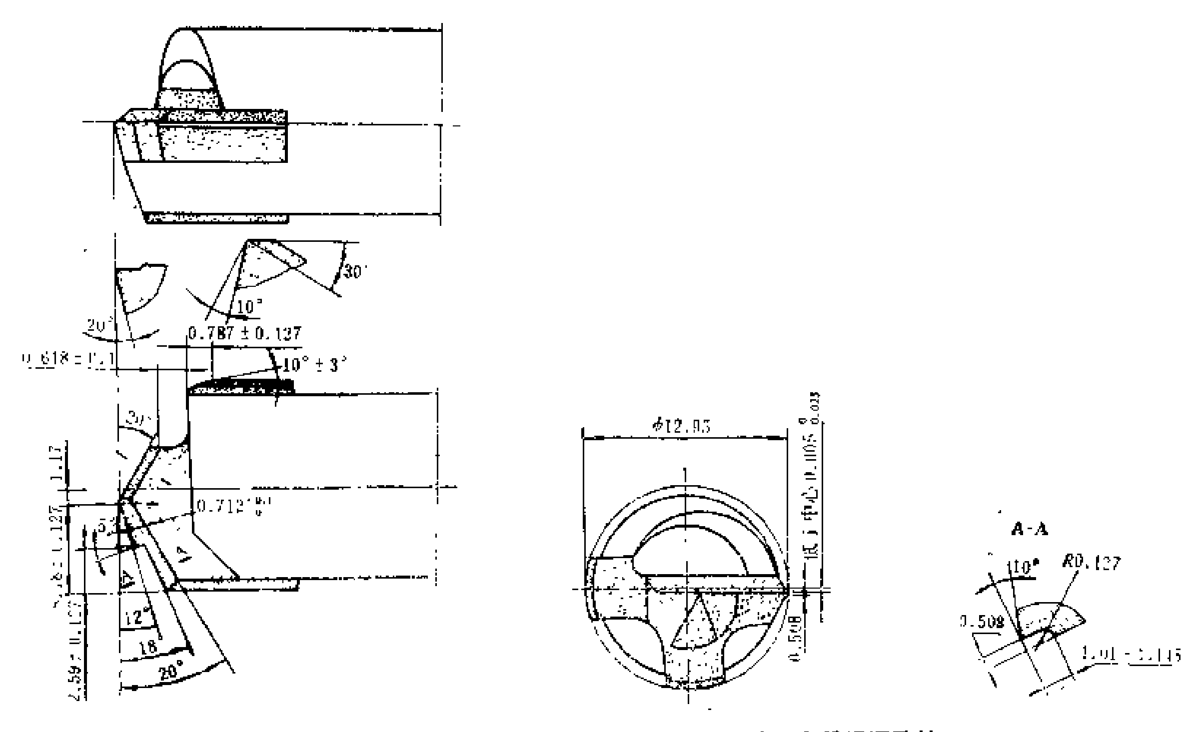


图6-13　ϕ12.95mm镶硬质合金的单刃内排屑深孔钻

为了保证冷却液的供给，刀头部磨出较大的台阶（0.6mm）。内外切削刃均低于中心，钻尖偏距为0.1d，钻头的内刃上没有磨出断屑槽，但需磨出－30°的负前角，以加强内刃的强度。为了得到很窄和成"C"字形的切屑，以利排除，将外切削刃分为两段（即阶梯形），并在其上磨出断屑槽。

（五）喷吸钻

喷吸钻是六十年代初期开始应用的一种新型深孔钻。它也是一种采用BTA（Sandvik）内排屑硬质合金深孔钻，在排屑系统中利用喷吸原理，改善排屑条件。它的主要特点表现在排屑方法（利用喷吸效应排屑）和钻杆结构（有内、外钻管）上，如图6-14所示。它是由钻头10、外、内钻管5和6、连接器8及导套4等组成。具有一定压力（一般为1～2MPa）的切削液由进油口9流入连接器8。其中2/3的切削液经内外钻管之间并通过钻头10上6个直径为D_1的小孔以及反压间隙2流向切削区，对切削部分和导向部分起冷却、润滑和排屑作用，由于内外钻管之间的环形面积大于钻头6个小孔的面积，而6个小孔的面积又大于反压间隙的环形面积，这样，切削液至切削区的流动过程中，流通面积逐步减小，流速加快，成雾状喷出，有利于对钻头的冷却和润滑。另外1/3的切削液经过内钻管末端上很窄的月牙形喷嘴，高速喷入内钻管后部，形成一个低压区，将切削区的切削液和切屑吸入内钻管，并迅速向后排出。采用喷吸钻钻孔时，切削液压力稳定，不外泄，排屑顺利，因此大大改善了钻头的工作条件，从而保证了切削工作可以在较大的切削用量下进行。喷吸钻结构较完善，加工质量较好，生产效率较高。由于它利用喷吸效应，所用切削液的压力较低（比普通内排屑深孔钻所用的压力减小一半），故不需防止冷却液泄漏的专门密封装置。但是，由于喷吸钻的钻杆是由内外两层组成，钻管的强度和刚性较差，且排屑空间减小，故对断屑要求较严。要求切屑成"C"形或瓦片状，否则容易阻塞。这种钻头用于小直径钻孔，不仅钻管强度、刚度低，排屑不顺利，同时制造也困难。所以喷吸钻适用于钻直径为$\phi 20$～60mm的深孔，这时钻头采用多刃交错焊接结构。

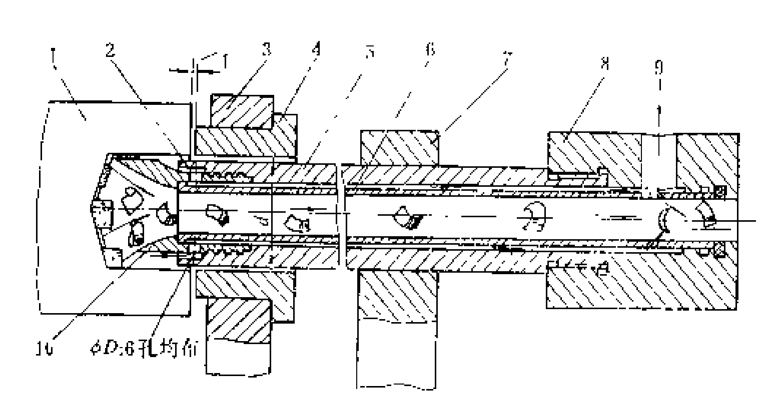


图6-14 喷吸钻工作原理图

1—工件；2—反压间隙；3—支架；4—导套；5—外管；6—内管；
7—支架；8—连接器；9—进油口；10—钻头

枪钻、内排屑深孔钻和喷吸钻在碳素结构钢件上钻孔的切削用量见表6-5。

喷吸钻有很多优点，但只适用于钻较大的孔径，在枪管孔径范围内是使用不上的。能不能通过改进，把它运用于枪管上的钻孔呢？回答是肯定的，这就是单管喷吸钻。

表6-5 深孔钻削切削用量

钻头类型	国外			国内		
	直径范围 d(mm)	切削速度 v(m/min)	进给量 f(mm/r)	直径范围 d(mm)	切削速度 v(m/min)	进给量 f(mm/r)
枪钻	2～30	80～125	0.005～0.10	4～20	15～25	0.005～0.15
内排屑深孔钻	6～100	100左右	0.15～0.20	13.5～51	20～60	0.01～0.18
喷吸钻	20～75	60～130	0.15～0.30	19.25～40	50～85	0.14～0.27

单管喷吸钻又叫双输油器深孔钻，或称DF（Double Feeder）系统。它是把喷吸钻的内外两层钻管去掉其内管，只用一根钻管，并用两个输油器分别完成切削部分的供油和钻管尾部喷吸部分的供油。其工作原理如图6-15所示。在工件孔端面处安装了液压头，向刀具切削部分供给推压冷却液，在钻杆尾部装备能产生真空吸引作用的装置，把推压和吸引两种方式的排屑结合起来，冷却液流速加快，提高了排屑能力。由双管改为单管使排屑孔加大，有利于排屑，从而有可能把喷吸钻用于钻更小的孔，同时管壁可加厚些，故可提高钻杆刚性和增大进给量，但是由于冷却液是由钻杆外壁流入切削区，因此要增加一套冷却液输送密封装置。

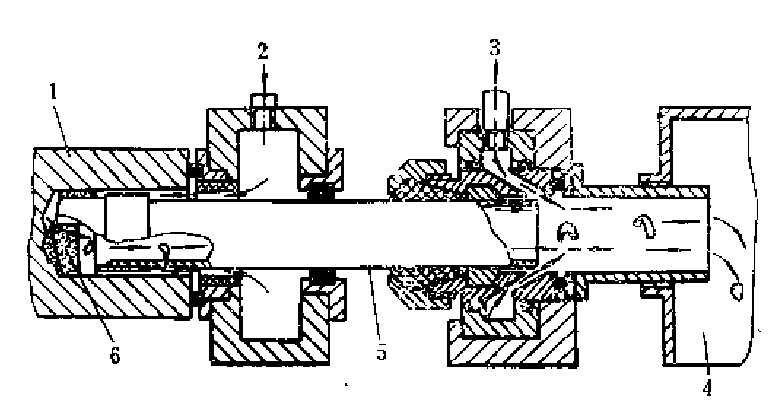


图6-15 单管喷吸钻的工作原理

1—工件；2—推压式冷却液入口；3—吸引式冷却液入口；

4—切屑和冷却液排出通道；5—钻杆；6—刀具

小直径孔（ϕ6～20mm），特别是ϕ10mm以下孔的加工方面，采用单刃外排屑深孔钻，因为刀具刚性差，故生产效率低；采用BTA钻头，由于冷却液通道小，则需要很高的压力，使钻削加工不容易稳定；而采用单管喷吸钻，虽然冷却液通道也很窄小，但由于兼有推、吸的作用，所以冷却液的流动很顺利，排屑也很轻松。可以充分发挥刀具的性能，在使用大进给量时可以得到较高精度，而且加工时很稳定。

四种钻头加工时进给量的对比情况如图6-16所示，由图可见，单管喷吸钻能高效率而稳定地钻削直径小至6mm的孔，它比单刃外排屑深孔钻（枪钻）的效率高三倍以上。用它来钻削中等直径（ϕ20～65mm）的孔效果也很好。但用它来钻削ϕ65mm以上的大直径时，其优点就不显著了。

目前我国的枪管深孔钻削中，仍然采用单刃外排屑深孔钻，在小口径炮管的钻孔中，既采用单刃外排屑深孔钻，也用单刃内排屑深孔钻，它们的生产效率均比较低。

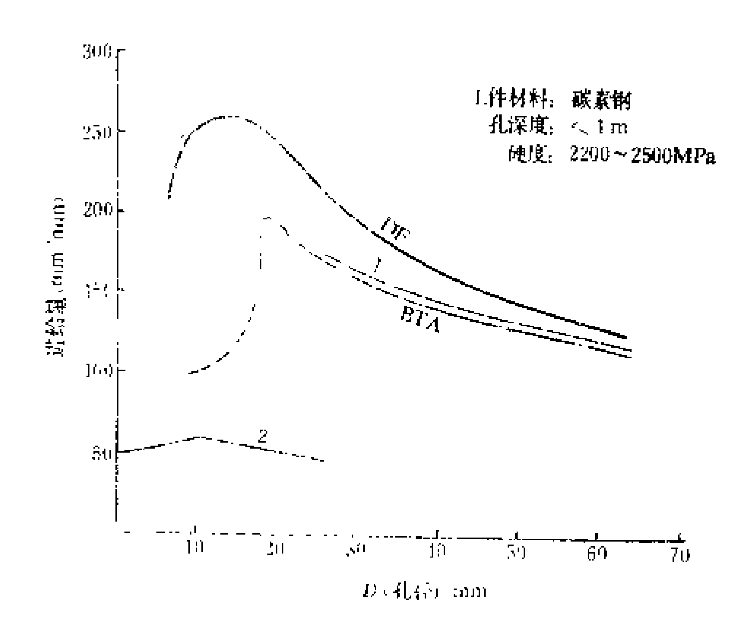


图6-16　四种钻头进给量的对比

1—喷吸钻；2—枪钻

五、深孔钻削用的机床

（一）对深孔钻床的要求

深孔钻削所用的机床，不仅应满足对钻床所提出的一般要求，同时还应该满足以下各项要求：

1．能够有效地消除钻头的走偏和孔的扩张；

2．能连续地供给冷却润滑液和排屑；

3．当负荷（扭转力矩）过大时能自动停车；

4．可以实行多机床管理。

（二）深孔钻床的种类

深孔钻床的种类很多，可按其特征进行分类。

1．按运动方式分　可分为四种，见本节(三)深孔钻削方式。

2．按主轴的位置分　可分为卧式和立式两种。

3．按主轴的数目分　可分为1、2、4、6、8、10、12轴等几种。

4．按机床的自动化程度分　可分为一般的和半自动的两种。

目前我国在枪管制造中均采用双轴卧式深孔钻床（图6-17）。下面对此种机床作一简单介绍。

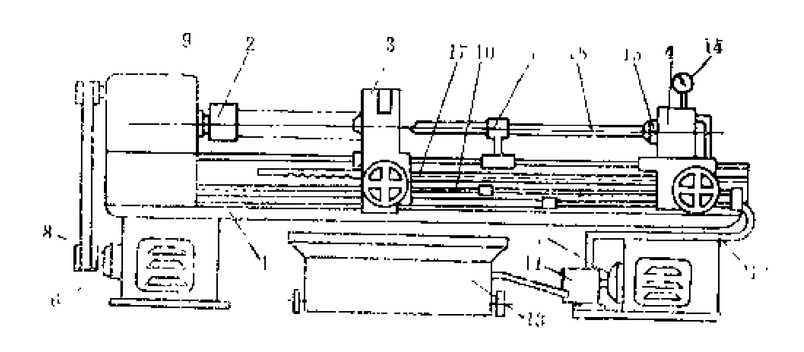


图6-17　双轴卧式深孔钻床

双轴卧式深孔钻床是由工作上互不关联的、结构上完全相同的且对称于机床纵向轴线的两个部分组成。机床的主要部分有：

（1）工作部分　包括床身1、车头2、尾架3（装有排屑通道）、刀架4和钻杆支架5；

（2）动力部分　包括两个带动主轴转动的电机6和两个带动油泵的电机7；

（3）传动部分　包括皮带传动部分8、变速箱9、光杠10以及齿条17等；

（4）冷却润滑部分　包括油泵11、管路12、油槽13和油压表14。

钻孔时，枪管毛坯的左端夹持在主轴上的三爪卡盘中或星形锥形卡头上，枪管尾部以预先打好的中心孔架在尾架的空心顶尖上，然后将尾架固定于床身上。刀架由光杠带动，使钻头完成进给运动，冷却润滑液由油泵11打入管路12，经刀架中间的通路进入钻杆16的内孔。为了避免在钻削过程中钻头变钝、毛坯材料过硬或切屑阻塞等原因，使钻头承受的扭转力矩增大，而使钻杆扭断，一般在钻杆尾部夹持处（15）设有保险机构（图中未画出），当钻头扭矩达到某个限定值时，它可以使送进机构连同主轴一起停止运动。

必须指出的是：国内采用的这种机床是落后的，它占地面积大，生产率低；在国外早已采用多轴（8、12轴）立式半自动钻床，它们占地面积小，生产率高。因此需要积极研制或引进，使深孔钻削的设备达到先进水平。

六、深孔钻削用的冷却润滑液及切削用量

（一）深孔钻削用的冷却润滑液

1．对冷却润滑液的要求

（1）有较好的冷却作用和润滑作用，并有足够的流动性；

（2）没有腐蚀性，不危害工人的健康；

（3）价廉不乏。

2．常用的冷却润滑液

冷却润滑液的质量和供给量严重地影响刀具耐用度、顺利地排出切屑和孔的加工质量。

我国曾普遍采用植物油（菜油、豆油和花生油）作为冷却润滑液，它有较好的润滑性能，但来源有限，且工作时的油温较高，容易挥发变质和阻塞管道，故逐渐被矿物油所代替。纯粹的矿物油会降低生产率，增加钻头的消耗，使加工质量变坏，故一般不采用。常用的冷却润滑液为含硫1%或含植物油10%的锭子油。

冷却润滑液的工作温度一般应保持在20°～50°C。温度过低（冬天），油的粘性过大，流动性下降，对排除切屑不利；温度过高（在70°C以上），油的润滑性变坏，粘性小，油压有所下降，有时还有气泡混入油路中，给冷却润滑及排屑带来一系列困难。

为了保证顺利地排屑，必须要有足够的供油量。供油量的大小与钻头直径、油压、油温等因素有关，具体确定时可查阅有关资料。

供油压力，对不同的钻削孔径有不同要求。直径小时，油路小，油压损失大，排屑阻力大，随着直径的增大，排屑条件改善，供油压力也逐渐降低。

当钻削孔径为5～10mm时，$p=3.5\sim4.5$MPa

当钻削孔径为10～20mm时，$p=3$MPa

（二）深孔钻削用的切削用量

深孔钻削用的切削用量，在表6-5中已列出。如何选择切削用量，则应根据第五章所提出的原则，即在保证规定的刀具耐用度条件下，首先选择最大进给量，然后根据公式计算出

切削速度。

枪管钻的耐用度，通常取钻削一根枪管所需时间的倍数，习惯上多用总的钻孔深度为单位，这样便可计算出钻头刃磨一次所钻的枪管数。根据某厂的经验，对于高速钢钻头一次刃磨可钻孔深10m以上。

为了提高生产率，需要选取最大的进给量，但是采用单刃外排屑深孔钻钻孔时，由于受钻杆刚度、强度以及排屑的限制，不能选取大的进给量。进给量大，切削时的送进力和扭转力矩均大，钻杆难以承受；切屑的刚度大，厚而长的切屑很难从深孔中排出。要容易排屑，要求切屑的形状成折皱的薄带状，它在较高的油压下能很好地由钻头排屑槽中排出，而要获得这种切屑，只有在较小进给量的条件下才能得到。所以对于口径为7.62mm 的枪管，钻孔时一般进给量$f=0.01\sim0.026$mm/r，对于大口径枪管f取得大一些，例如钻削14.5mm 枪管时$f=0.07$mm/r。

有了耐用度标准，有了进给量的数值，便可通过公式计算出切削速度来。一般高速钢单刃外排屑深孔钻其切削速度$v=35\sim65$m/min。在相同的条件下，用硬质合金钻头比高速钢钻头其切削速度可提高60%。

七、深孔钻削的质量分析

深孔钻削工序是一道粗加工工序，要求不是很高，但它的质量对整个枪管加工过程有很大的影响。钻孔质量主要表现在内孔表面粗糙度、内孔直径和孔的轴线的偏离上。要求孔壁没有粗而深的刻痕（深圈）、孔径不能太小、孔的走偏量不能超过允许值（对7.62mm 枪管允许走偏1.5mm，对12.7mm枪管允许走偏2.5mm）。在实际生产中，常常发生内孔有深圈和走偏量超过允许值。特别是走偏量有时达到8～10mm，造成废品，严重影响枪管生产任务的完成和生产的经济性。

影响钻头走偏的因素有：机床、枪管毛坯、钻头结构及其几何形状、切削用量、冷却润滑液和机床看管等。现分析如下：

1．机床的影响　机床的运动特性、制造精度（机床主轴的跳动量、主轴中心线与导轨的平行度、尾架空心套筒轴承的松动量、空心顶针的外锥体与内孔的同轴度、主轴、尾架及刀架轴线的同轴度等）和调整状况，均能影响钻头走偏的大小。

2．枪管毛坯的影响　它包括毛坯的直度、中心孔的形状、材料的硬度和材质的均匀性等。毛坯必须校直，否则会增大主轴的跳动量及振动，从而会增大走偏，同时还会增大机床的磨损与降低钻头的寿命。中心孔的形状有多种，如图6-18所示。图6-18（a）的几何形状与深孔钻钻尖完全吻合，且有圆柱部分导向，不易走偏，但中心钻制造与刃磨复杂；图6-18（b）的形状为钻尖首先开始工作，然后由内刃和外刃均匀地进行切削，是一种比较好的结构；图6-18（c）的形状在钻头引入时，径向切削力偏向一边，不利于正确导向，且容易损坏切削刃。在实际生产中图6-18（b）型中心孔用得比较多。枪管毛坯的硬度不一致，特别是同一断面上的硬度不一致，会使切削刃上的水平分力不等，使钻头压向较软的一边，产生走偏。

3．钻头的结构及其几何形状的影响　前已分析，为了保证不走偏和有良好的导向，要求钻头：$e\leqslant d/4$或$\psi_{r_1}\geqslant\psi_{r_2}$，以使钻头切削刃上切削力的水平分力指向中心；有较大的圆柱面或三点定圆导向；内切削刃低于中心，无零切削速度，有零位柱心改善导向；有内切刃形成的孔底圆锥面起定心作用。但是由于切削刃上各点的切削速度是不同的，外刃上的平均切

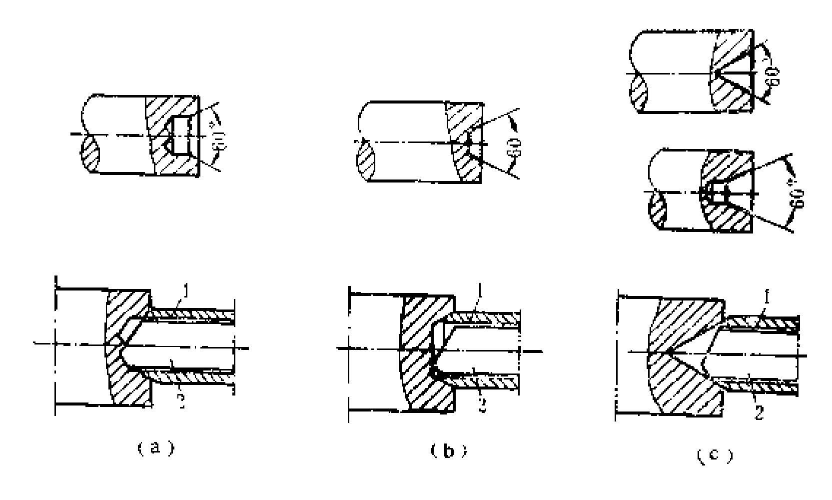


图6-18 中心孔的形状及钻头的引入

(a)孔底为钻尖形；(b)孔底为平面；(c)孔底为尖形

1—空心顶尖；2—枪钻

削速度为钻头的切削速度的3/4，而内切削刃上的平均切削速度则为1/4，切削速度不同，切削力也不同，其关系如图6-19所示。由于切削刃上水平分力的合力随切削速度而变化，这个合力的大小与方向是否合理，也会影响走偏。

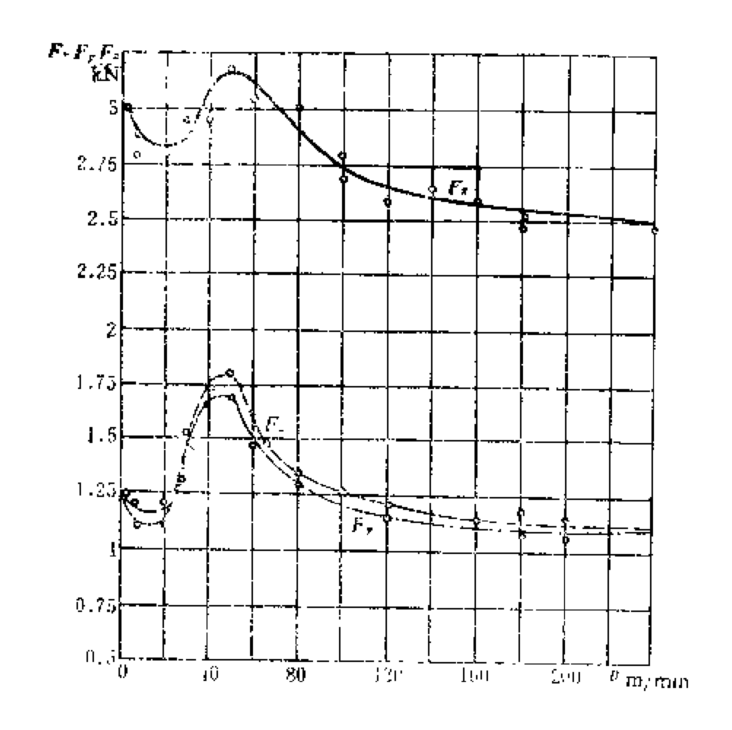


图6-19 切削速度对切削力的影响

此外，钻杆的直度、钻头与空心顶针间的配合间隙，对走偏也有影响。

4．切削用量对走偏的影响　当进给量增大时，切削力增大，切屑变厚，排屑条件恶化，增大了产生走偏的可能性；切削速度影响切削刃上水平分力的合力大小与方向，因此也有可能影响走偏。

5．冷却润滑液　它的质量、供给量和油压，影响切削力和排屑条件，因而也影响走偏。

6．机床的看管　主要是进刀时不能过猛，刀具磨钝产生强烈振动时，应及时更换刀具，

否则也会影响走偏。因此要求勤检查，及时发现不正常情况，及时排除。

八、提高深孔钻削生产率的途径

深孔钻削的生产率低，钻一根枪管往往需要几十分钟，因此这一工序常常是枪管生产过程中的薄弱环节。它占用的机床多，生产面积大，工人数量多，工件存放时间长，造成流水线的阻塞。所以提高枪管深孔钻削的生产率是一个非常迫切的问题。提高枪管深孔钻削生产率的途径有：

1．设计多轴立式钻床，以提高工人的劳动生产率，并减小生产面积；

2．实现深孔钻削过程的半自动化和自动化，以减少辅助时间和工人的体力劳动；

3．提高切削用量。这是最基本的途径，为此要求：

（1）改进钻头的结构，采用先进的钻削系统，例如采用单管喷吸钻，双进油器即DF系统，以提高进给量；

（2）改进刀具材料，例如用硬质合金代替高速钢，以提高切削速度；

（3）改进机床结构，提高机床性能，以适应采用新的钻削系统和提高切削速度的要求，例如提供双进油器、提高主轴转速、增大供油量、贮油量以及实行人工冷却等。

第五节　枪管的深孔铰削

一、概述

（一）铰孔的作用及其基本工序

枪管毛坯在钻孔后孔的表面粗糙度较大，形状精度和尺寸精度均很低，为了得到较小的表面粗糙度、较高的尺寸精度、形状精度的孔，为后续工序和形成膛线作好准备，在钻孔后需要进行铰孔。

枪膛在钻孔后所留下的余量是相当大的，一般为0.5～1mm，要得到质量很高的孔，这样大的余量不可能用一个工序、一把铰刀全部切除，通常需要将铰孔分为粗铰、半精铰和精铰三个基本工序，利用不同尺寸的铰刀依次进行加工，使工序余量和加工误差逐步减小，最后达到具有较小表面粗糙度和较高精度的光膛表面。三个基本工序不能安排在一起，连续进行加工，而应合理地安排在整个工艺过程中。

由于科学技术的不断发展，新工艺不断被采用，内膛加工常用的三个基本工序，目前多被铰孔——冷挤压或高速铰孔——电解加工所代替，这不仅保证与提高了孔的加工质量，同时也大大提高了生产率。

（二）深孔铰削的特点

深孔铰削与一般铰削不同，其主要特点是：需要连续不断地供给润滑冷却液并排除切屑；需要有良好的导向；铰刀的中心线应与工件孔的中心线严格地重合。为此，在机床上应有供给润滑冷却液的装置和附件，在刀具上也应有能通过液体和排除切屑的结构外形；铰刀的校准部分相应地要做得长一些；在枪管与刀具之间尽可能有浮动的环节，例如在有的机床上装夹枪管时使枪管一端浮动。

（三）深孔铰削的运动方式及方法

枪膛铰削时，刀具与工件的运动方式不象钻孔时那样有严格要求，通常采用下列两种方式：

1．铰刀随主轴回转，工件送进；

2．工件随主轴回转，铰刀送进。

由于第一种运动方式工件装夹方便，机床构造更为简单，所以用得比较广。

深孔铰削的方法有两种：推铰法，铰刀推过枪膛，如图6-20（a）；拉铰法，铰刀拉过枪膛，如图6-20（b）。

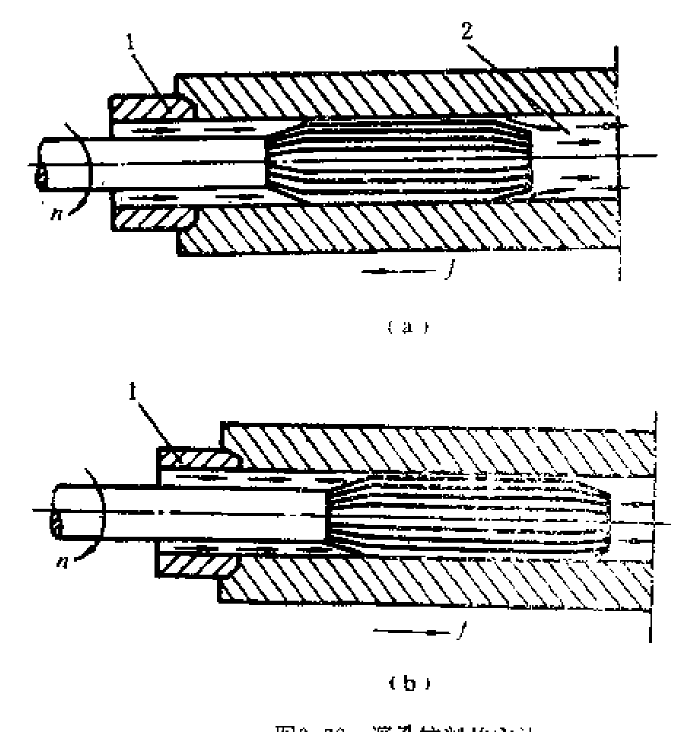


图6-20 深孔铰削的方法

（a）推铰；（b）拉铰

1—空心顶尖；2—润滑冷却液流动方向

推铰时铰刀的前锥是切削刃，刀具的制造、刃磨较为方便；刀杆通过已铰大的枪膛，其直径可做得稍大些；但由于刀杆承受轴向压力和扭力，其压力可使刀杆发生弯曲而擦伤已加工的枪膛表面；铰孔完毕后，需要将铰刀退出枪膛，以便重新装夹，这时可能会损伤已加工的枪膛表面，或者在铰孔完毕之后，先卸下铰刀，然后将刀杆退出枪膛，再装上铰刀，这将使辅助时间增加。

拉铰时刀杆承受轴向拉力和扭力，不会发生弯曲；加工完毕后，铰刀已拉出枪膛，重新装夹时，不会损伤已加工的表面；切屑通过已铰大的枪膛排出，排屑条件更为有利；但铰刀的切削刃靠近刀杆，刃磨较为困难；每铰完一根枪管，必须取下铰刀，才能重新安装、加工，致使辅助时间增加。

两种铰孔方法，各有利弊，在我国工厂中，两种方法均采用。

（四）枪膛的高速铰削

为了获得较高尺寸精度和较小表面粗糙度的孔，提高生产率和延长刀具的寿命，在枪膛铰削中已采用硬质合金铰刀进行高速铰削。由于小直径的硬质合金铰刀制造比较困难，所以高速铰削目前多用于大口径枪管的加工中。

深孔高速铰削有以下几个特点：

1．刀具为硬质合金铰刀，工作部分做得比高速钢铰刀短一些，采用拉铰法，切削锥体靠近柄部，在切削的同时，伴随有对内孔的挤压作用，加工后孔略有收缩，其收缩量一般为0.005～0.02mm。

2．切削用量大，生产效率高。它的切削用量可达：$v=70\sim90m/min$，$f=0.5\sim0.6mm/r$，$a_p=0.5\sim1mm$。

3．能获得较高质量的孔，加工精度IT9～7级，表面粗糙度$Ra1.6\sim0.4\mu m$。

4．由于采用拉铰，刀杆受拉力，没有弯曲变形，且可承受较大的切削抗力，故可用于孔径较小的深孔加工，铰出的孔直线性较好，拉铰后，铰刀已离开深孔，故刀齿不会损伤已加工表面。

5．采用刀杆内通入高压冷却液，切屑能及时排除，但需有专门的冷却装置。

二、深孔铰刀

深孔铰刀是由铰刀和刀杆组成。铰刀可由碳素工具钢、合金工具钢和高速钢制成或镶嵌硬质合金刀片而成。

（一）高速钢铰刀

图6-21所示为一种枪膛铰刀的结构。它由工作部分和柄部（与刀杆联接部）组成。工作部分包括前锥、校准部分（导向部分）和后锥。当采用推铰法时，前锥是切削部分，若采用拉铰法时，则后锥是切削部分。现以推铰法所用的铰刀为例，其几何参数如下：

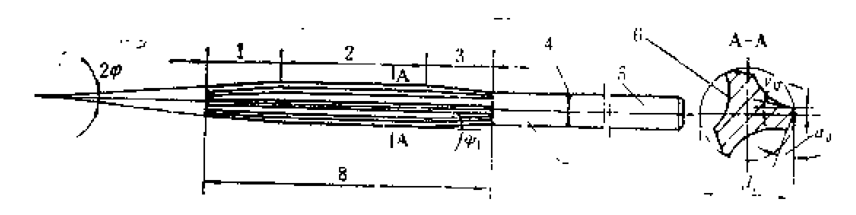


图6-21 深孔铰刀的结构

1—前锥；2—校准部分；3—后锥；4—焊接处；5—刀杆；6—曲线形齿槽；7—柄部；8—工作部分

1．前锥角2φ　前锥是切削部分，为了使切屑薄而长，便于排屑，以及提高刀具开始切入时的稳定性和改善其导向性，一般2φ取得比较小，常为4°。由于锥角小，前锥也相应地加长了，一般约为铰刀直径的2～2.5倍。为了便于排屑，有的铰刀在前锥上设有分屑槽。

2．铰刀直径d_t　指的是校准部分的直径。铰刀的直径和公差直接影响被加工孔的尺寸精度、铰刀的制造成本与使用寿命。在确定其直径和公差时，应考虑到被加工孔的公差T_D、

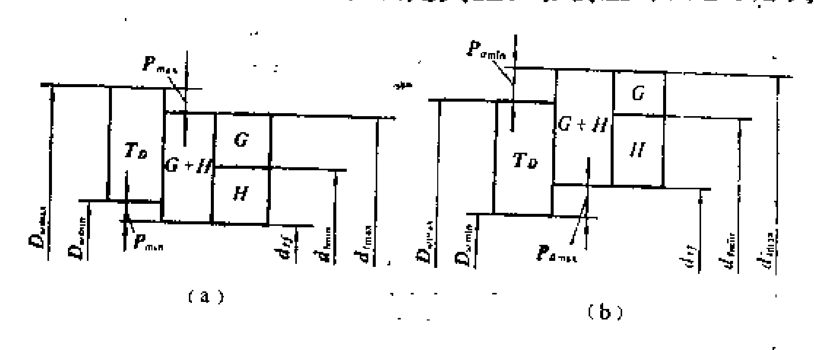


图6-22 铰刀直径的确定

（a）孔有扩张时铰刀直径的确定；（b）孔有收缩时铰刀直径的确定

铰削时孔的扩张量P(或收缩量P_a)、铰刀使用时的磨损储备量H和铰刀本身的制造公差G，它们之间的关系如图6-22所示。

铰刀在工作时，由于铰刀刀刃的径向跳动、工件与工具的安装偏差、积屑瘤的作用及加工材料、铰削用量、切削液等因素的作用，铰出的孔径常比校准部分的实际直径大，产生扩张现象。此时，铰刀的直径应按下式确定〔图6-22(a)〕

$$d_{t\max}=D_{w\ \max}-P_{\max}$$

$$d_{t\min}=D_{w\ \max}-P_{\max}-G$$

$$d_{tf}=D_{w\ \min}-P_{\min}$$

式中 d_t——铰刀直径；

D_w——工件铰孔直径；

d_{tf}——铰刀报废尺寸；

P——铰孔扩张量，一般为0.003～0.02mm；

G——铰刀的制造公差。

对于铰孔孔径有收缩的铰刀，其直径应按图6-22(b)所示确定。

3. 铰刀校准部分的长度l　由于校准部分起修光孔壁、消除孔的局部弯曲、提高孔的加工精度并使铰刀在孔内有良好的导向等作用，故其长度应正确确定。若过短，则不能消除孔的弯曲与进行良好的导向；若过长，则使摩擦力增加，温度升高，铰刀寿命降低，排屑条件变坏，铰刀退出时孔扩大的可能性增加。对于口径为7.62mm的枪管，铰刀校准部分长度l稍大于3倍铰刀直径d_t，对于12.7mm、14.5mm的枪管，$l=(3\sim2)d_t$。

4. 前角γ_0　对粗铰刀可取正值或0°；对精铰刀一般采用负前角，以利于提高孔的加工精度和减小表面粗糙度。

5. 后角α_0　一般取5°～8°。

6. 刃带f　为了使铰刀能够起修光、定径和导向作用，以减小加工表面的粗糙度并校准孔的直径，校准部分必须留有刃带。为了减少刃带与孔壁的摩擦，刃带不宜过宽。一般取$f=0.15\sim0.4$mm。

7. 后锥角$2\varphi_1$　为了消除孔被擦伤和减少铰刀从枪膛中退出时使孔扩张，在铰刀上需做出后锥，一般取$2\varphi_1$约等于6°。考虑到铰刀与刀杆连接处的强度，后锥部分不能做得太长，一般取其长度约等于2倍铰刀直径或稍小些。

8. 齿数Z　主要取决于刀具的直径和加工余量的大小。在枪管的铰孔中，基本上采用三齿和五齿铰刀。7.62mm的枪管，常用三齿铰刀。三齿铰刀的优点是：齿数少，齿间距大，齿槽宽，有利于排屑；齿的强度大，可切去较大的余量；扭转力矩、轴向力与多齿铰刀相比相对地较小，减小了刀杆的变形；齿数少，制造容易，但测量时不能用通用量具，而需用专用样圈来检验。

9. 齿槽　它的作用是容纳切屑、并通过切削液排除切屑。一般齿槽采用直槽，齿槽表面可由平面构成或制成曲面，曲面排屑情况稍好，且淬火时发生裂纹的可能性小。

(二)硬质合金铰刀

硬质合金铰刀(图6-23)由刀体、刀片和导向套组成。刀体上又可分为镶嵌硬质合金刀片的工作部分、装导向套的导向部分和与刀杆相连接的连接部分。导向套是木质的，连接部分采用矩形螺纹。铰刀的工作部分做得比较短，这是因为工作部分长度等于硬质合金刀片的

长度，缩短铰刀的工作部分，可增强铰刀的抗振性。工作部分又分为切削部分、校准部分和后锥部分。硬质合金深孔铰刀，采用的是拉铰方式，故切削部分靠近刀杆一方。这种铰刀的几何参数如下：

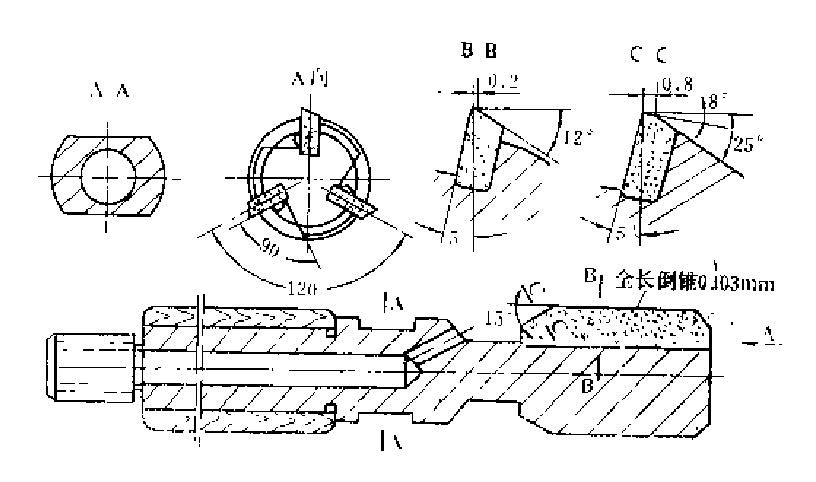


图6-23 镶嵌硬质合金刀片的三齿铰刀

1．切削锥角2φ 当$2\varphi=10°$时，切入时易振动，发生打刀；当$2\varphi=90°$时，刀口尖点负荷过重，容易产生崩裂，使表面粗糙度加大，一般取$2\varphi=30°$，这时可得到较小的表面粗糙度。

2．校准部分的直径和长度 由于高速铰孔后一般孔径要产生收缩，故校准部分的直径应按图6-22（b）所示情况来确定。为了保证铰削过程中的引导作用及铰刀切削部分的刃磨，校准部分的长度一般取0.8～1.5倍铰刀直径。

3．前角 采用负前角，一般为0°～－5°。

4．后角 其值过大会削弱刀齿强度，过小会引起后面磨损恶化，一般取主后角等于8°～12°，第二后角为15°～25°。

5．刃带 校准部分应留刃带，但不能太大，否则孔的收缩率和圆度误差增大，表面粗糙度恶化，一般刃带宽为0.1～0.25mm；切削刃上的刃带应尽量小，一般刃带（线）宽度为0.03～0.05mm。

6．倒锥度 在校准部分上应做成倒锥度，这样，可使铰刀在铰削时平稳、无噪音、阻力小，一般全长倒锥为0.005～0.06mm，直径大者取大值。

7．过渡刃 在切削刃与校准刃之间，应制造过渡刃，其长1～2mm，锥角为3°～5°。

8．后锥角及其长度 校准部分末应有后锥，其作用是避免划伤孔壁，一般后锥角为6°～10°，后锥长为3～5mm。

此外，为了保证硬质合金铰刀刀齿的强度和足够的容屑空间，其刀齿数通常要比同样直径的高速钢铰刀的刀齿数少。

铰刀与刀杆的连接有可拆卸的和不可拆卸的两种。不可拆卸的为焊接，装刀与刃磨均不方便，现已被淘汰；可拆卸的连接有键槽连接和螺纹连接，前者用于7.62mm枪管铰刀与刀杆的连接，后者用于大口径枪管铰刀与刀杆的连接。

三、深孔铰削所用的机床

（一）对深孔铰床的要求

为了有效地对枪管深孔进行深孔铰削，对深孔铰床有下列要求：

1．能在一定压力下不间断地供给润滑冷却液；

2．应能使铰刀严格地对准枪膛轴心线；

3．夹持刀具和装夹工件能做到迅速、方便，且能实现多根枪管同时加工；

4．工作循环后能自动停车，并能使工作台迅速回到原来的工作位置；

5．使用和制造简便，且外廓尺寸不大。

（二）深孔铰床的种类

一般可按下列特点进行分类：

1．按主轴的数目分　有2、4、5、6、8、12、18轴等几种。

2．按主轴的位置分　有立式的和卧式的。

3．按自动化的程度分　有普通的和半自动的。

4．按辅助运动的传动分　有齿轮式的、液压式的和带平衡锤式的。

在我国的兵工厂中多用卧式5、6轴深孔铰床，而在国外有的采用12轴立式铰床和带多位回转夹具的液压18轴半自动铰床。

（三）六轴卧式深孔铰床

六轴卧式深孔铰床的简图如图6-24所示。装有铰刀8的六根铰刀杆13夹持在六根主轴15中作旋转运动，而工作台10作进给运动。六根枪管6在工作台10上排成一排，其尾端装在带有空心顶尖的铰刀导向套筒3上，另一端放在支架7上，并用夹具5将其夹紧。主轴15的旋转运动由电动机1，通过皮带轮经螺旋齿轮（或蜗杆蜗轮）传动装置14获得，工作台10的进给运动是通过齿轮、蜗杆蜗轮、带有蜗杆传动装置的伸缩轴11、再经蜗轮、齿轮和齿条12获得。工作台的回复运动是用手借手柄9进行的。润滑冷却液是由皮带轮带动油泵2，经管带4送入铰刀用的导向套筒3，再经刀杆与枪膛中间的空隙到达切削刃，然后携带切屑从枪管末端冲出。液体的放入均有开关控制。由于油泵和机床主轴所消耗的功率均不大，故均用同一电动机带动。

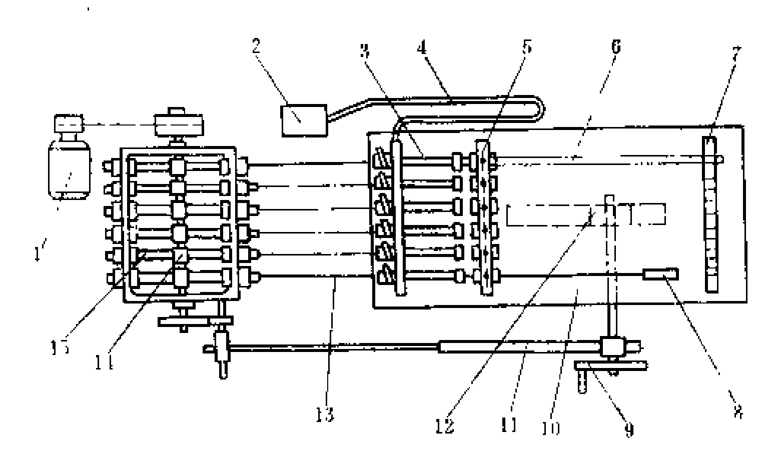


图6-24　六轴卧式深孔铰床的简图

四、深孔铰削用的切削用量和润滑冷却液

铰孔是一种精加工及半精加工方法，为了保证被加工孔的质量，切削余量应很小，切削速度应避开积屑瘤的生成速度范围。通常粗铰余量为0.15～0.25mm，半精铰为0.05～0.2mm，精铰则不大于0.05mm，由于钻孔后内膛留下有较大的余量，故在粗铰与半精铰工序中，往往用两把或多把不同直径尺寸的铰刀进行铰削。铰削的进给量f一般取0.5～1.2mm/r，

切削速度v取5.5～8m/min。

对于大口径枪管，由于采用硬质合金铰刀实行高速切削，其切削用量是比较大的，例如14.5mm枪管在高速铰孔工序中最大加工余量为0.8mm，采用5把尺寸不同的铰刀进行粗精铰孔，进给量$f=0.475$mm/r，切削速度$v=73$m/min（1600r/min）。

在深孔铰削中常用的润滑冷却液有以下三种：

1. 植物油　如菜油、豆油等。

2. 硫化油　其中锭子油89%，亚麻油10%；硫1%。

3. 混合油　其中亚麻油75%，锭子油25%。

根据枪管的口径、刀杆的结构和采用的铰孔方法，供给润滑冷却液的压力一般为1.5～4.5MPa。

第六节　枪膛的电解加工

一、概述

电解加工是本世纪五十年代开始研究并逐步应用于生产的一种新工艺。现在广泛应用于枪炮、航空、火箭、汽轮机、齿轮、花键、模具等的制造。

电解加工有下列优点：

1. 加工范围广，不受金属材料本身硬度和强度的限制，可以加工硬质合金、淬火钢、不锈钢、耐热合金等高硬度、高强度和高韧性的难切金属材料，并能以简单的进给运动加工出形状复杂的型面或型腔（如锻模、叶片等）。

2. 生产率较高，比电火花加工高5～10倍以上，在某些情况下比切削加工的生产率还要高（其例见第四章的电解加工柴油机内齿轮）。

3. 可达到表面粗糙度Ra0.8～0.2和±0.1mm左右的平均精度。

4. 加工中无机械切削力或切削热，故不会产生由于切削力或切削热所引起的残余应力和变形，也没有飞边毛刺，特别适合于易变形或薄壁零件的加工。

5. 加工中阴极（工具）在理论上不会消耗，可长期使用。

电解加工存在下列缺点：

1. 加工很细的窄缝、小孔以及棱角很尖的表面比较困难。

2. 由于影响电解加工的因素很多，故难于获得较高精度(例如±0.03mm以上的精度）的稳定加工。

3. 对复杂表面加工时工具电极的设计与制造比较费事，往往需要多次试验修正，因而在具有复杂表面的单件、小批生产中的应用受到限制。

4. 加工所需的附属设备比较多，占地面积比较大。

5. 电解液对机床、夹具等设备以及工件有腐蚀作用，电解产物的处理困难，环境污染比较大，工作条件比较差。

电解加工的特点是：工作电压低（6～24V），工作电流大（某些场合可达20000A），加工间隙狭小（0.1～0.8mm）和电解液流速高（5～60m/s）。

在枪炮制造中，电解加工主要用于光膛加工、线膛加工和弹膛加工。由于有的枪管采用了大余量挤光的新工艺，同时，普遍地采用硬质合金挤线工具代替了合金钢挤线工具，既提

高了工具的寿命，又发挥了用挤压法形成膛线的优越性(其生产率与质量均较电解加工高)，所以，电解加工目前仅用于某些枪管的光膛加工。在中小口径的炮管加工中，电解加工既用于加工光膛，又用于加工膛线。

二、电解加工的基本原理

（一）加工原理

电解加工是利用金属在电解液中产生阳极溶解的电化学反应原理，对金属材料进行成形加工的一种方法，如图6-25所示。图6-25（a）为其加工示意图，图6-25（b）和（c）为其成形原理。电解加工时，工件3接直流电源1的正极，工具2接电源的负极，工具向工件缓慢进给，使两极之间保持较小的间隙（0.1～1mm），具有一定压力（0.5～2MPa）的电解液从间隙中流过，这时阳极工件的金属被逐渐电解腐蚀，电解产物被高速(5～60m/s)的电解液带走。在开始加工时，阴极与阳极距离较近的地方通过的电流密度较大〔以细竖线表示两极间的电流，竖线的疏密程度表示电流密度的大小，见图6-25（b）〕，电解液的流速也较高，阳极溶解速度也就较快。由于工具相对工件不断进给，工件表面就不断被电解，电解产物不断被电解液冲走，直至工件表面形成与阴极工作表面基本相似相反的形状为止。

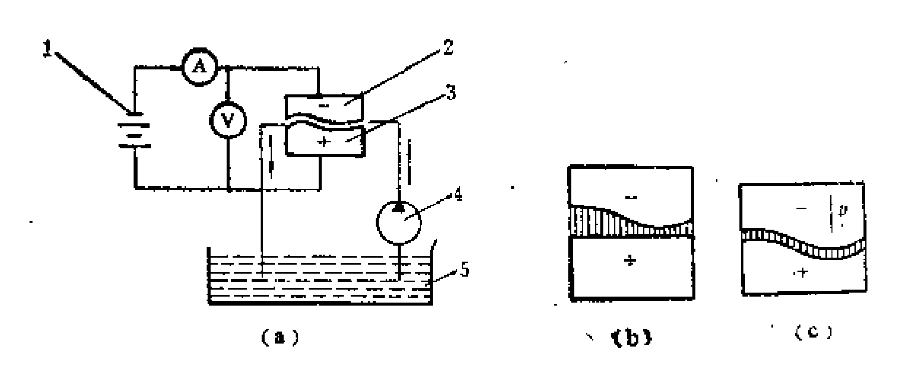


图6-25　电解加工原理图

（a）电解加工原理；（b）电解加工开始时；（c）电解加工进行中

1—直流电源；2—工具（阴极）；3—工件（阳极）；4—电解液泵；5—电解液

枪管光膛的电解加工，其加工原理与上述相同。所不同者是由于被加工孔是小的圆柱孔，一般采用固定式阴极杆（黄铜圆棒），将其穿过枪膛，并置于枪膛中央，然后从两端固定，所以工具阴极杆没有进给运动，电解液高速从枪膛壁与阴极之间的间隙流过，使枪膛的孔径被溶解增大，同时内膛表面粗糙度也随即减小。

（二）电化学反应

电解加工是一个复杂的电化学和化学的反应过程，它随加工条件（如工件材料的组成成分、电解液的成分、工艺参数等）的不同而有所不同。电解加工钢件时，通常采用浓度为10～18％NaCl水溶液作为电解液，其化学与电化学反应如下：

在NaCl的水溶液中，NaCl分子离解以及水本身微弱地离解为

$$NaCl \rightleftharpoons Na^{+} + Cl^{-}$$

$$H_2O \rightleftharpoons H^{+} + OH^{-}$$

根据奈斯特公式，可算出各种物质的电极电位，从而便可知道阳极、阴极的反应。电解加工时

阳极反应是　　$Fe - 2e \longrightarrow Fe^{+2}$

阴极反应是　　$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2\uparrow$

溶液中的反应为

$$Fe^{+2} + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2\downarrow$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \longrightarrow 4Fe(OH)_3\downarrow$$

$$Fe^{+2} + 2Cl^- \longrightarrow FeCl_2$$

$$FeCl_2 + 2Na^+ + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2\downarrow + 2NaCl$$

溶入电解液中的Fe^{+2}又与负离子OH^-化合，生成$Fe(OH)_2$，由于它在水溶液中的溶解度很小，故生成沉淀而离开反应系统。$Fe(OH)_2$沉淀为墨绿色的絮状物，呈薄膜状粘附于工件表面，随着电解液的流动而被带走，使工件的金属表面露出，继续产生阳极反应，不断对工件进行加工。由于工件表面的微观凸起部分与阴极间的距离较小，故电流密度较大，从而溶解速度也大，虽然$Fe(OH)_2$薄膜生成较快，且其电阻也较大，但由于微观凸起部分的$Fe(OH)_2$膜易于向溶液中扩散和被电解液冲走，故凸起部分较凹陷部分电阻小，电流密度大，因此，在电解加工中，不仅可以改变工件的尺寸和形状，同时还可使工件表面粗糙度减小。

在电解液中的$Fe(OH)_2$又逐渐为电解液中及空气中的氧氧化为$Fe(OH)_3$，它为黄褐色沉淀，被电解液冲走。

从上面可以看出，在电解加工过程中，在理想情况下，阳极铁不断以Fe^{+2}的形式被溶解，水被分解消耗，因面电解液的浓度稍有变化。电解液中的氯离子和钠离子起导电作用，本身并不消耗，所以NaCl电解液的使用寿命长，只要过滤干净，可长期使用。

由于钢中往往含有多种元素，对碳钢面言，存在着Fe_3C相，它在中性电解液中的平衡电位接近于石墨的平衡电位而很难电解。所以当钢件中Fe_3C的成分较多时，可能有少量的氯气或氧气析出，而且表面粗糙度也将增大。

（三）阳极金属的溶解量

阳极金属的溶解量服从于法拉第定律，即与电解电流I和电解时间t成正比，其值为

$$W = KIt$$

式中　W——金属的溶解量（g）；

K——金属的电化当量（g/A·min）；

I——电解电流（A）；

t——通电时间（min）。

在实际生产中，用体积表示金属的溶解量较为方便。此时，金属的溶解量常用下式计算

$$V = \eta\omega It \qquad 或 \qquad t = V/\eta\omega I$$

式中　V——金属溶解的体积（mm^3）；

η——电流效率　%；

ω——金属的体积电化当量（mm^3/A·min）；

I——电解电流　（A）；

t——通电时间　（min）。

已知金属或合金的电化当量、通电电流的大小和时间，便可计算出金属的蚀除量；反过来根据加工余量所占的体积，在选用一定的电流后，便可计算出通电加工的时间。

对于金属铁，$\omega = 2.22mm^3/A\cdot min$，亦可近似地用于碳素结构钢和低合金钢。铁和铁

基合金在NaCl电解液中的电流效率通常可按100%计算。

三、电解加工枪膛的工艺过程

（一）电解加工前的准备工序

1．枪管按内膛尺寸分组　其目的是确定各组的加工时间，使各组枪管均能达到规定尺寸。

2．去油　枪管内膛若有油膜存在，会影响导电，故在电解加工前必须去掉。一般采用化学去油，其溶液成分为：NaOH和Na_2SiO_3（或Na_3PO_4）。在沸腾的温度下，将枪管放入，其上的动、植物油与NaOH产生皂化反应，而将油除去，即

$$(C_{17}H_{35}COO)_3C_3H_5+3NaOH\longrightarrow 3C_{17}H_{35}COONa+C_3H_5(OH)_3$$

硬脂（油脂）＋苛性钠（碱）$\longrightarrow$硬脂酸钠（肥皂）＋甘油

对于不能皂化的矿物油，则通过Na_2SiO_3或Na_3PO_4产生乳化作用将其除去。

3．去锈　将枪管浸入稀盐酸中，以除去枪膛的氧化膜（锈）。其化学反应为

$$FeO+2HCl\longrightarrow FeCl_2+H_2O$$

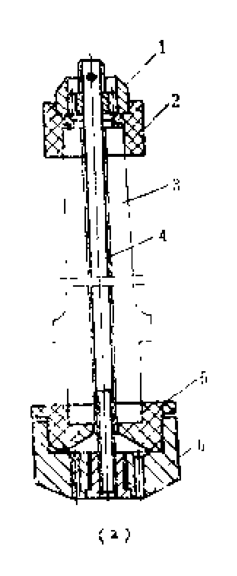
$$Fe_2O_3+6HCl\longrightarrow 2FeCl_3+3H_2O$$

$$Fe_3O_4+8HCl\longrightarrow FeCl_2+2FeCl_3+4H_2O$$

在去油之后要进行漂洗，在去锈之后也要进行漂洗、中和与漂洗。采用Na_2CO_3以中和残酸。

（二）电解加工光膛工序

电解加工时，枪管为阳极，工具为阴极。阴极有两种：固定式阴极，即阴极在枪膛中是固定不动的，主要用于枪管的加工，图6-26（a）为其安装图；移动式阴极，即阴极比较短，为了加工内膛，阴极必须缓慢通过内膛，它主要用于中、小口径炮管的内膛加工。阴极用黄铜制造，要求阴极直径一致，表面粗糙度小，直线度好，装入枪管内膛时恰在内膛的中央，以保证内膛表面与阴极表面各处距离相等，即有均匀一致的流通电解液的间隙，为此，在本工序加工前，枪管两端的径向定位部分，通常需要进行磨削，以提高直径精度和同轴度。



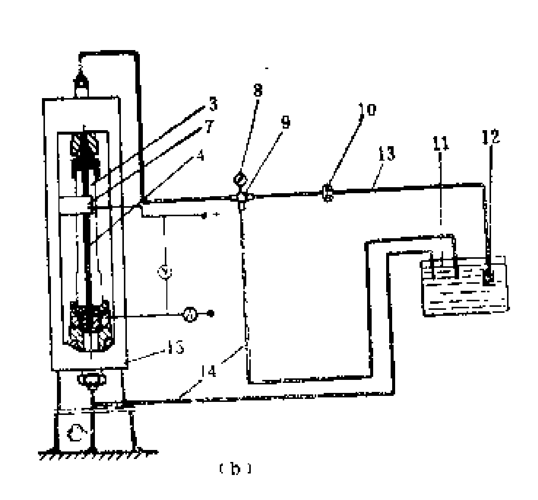


图6-26　电解加工光膛

（a）用固定式阴极加工光膛的安装图；（b）枪管电解加工示意图

1—上导电帽；2—上绝缘帽；3—枪管；4—阴极杆；5—下绝缘帽；6—下导电帽；7—阳极；8—压力表；9—调节阀；10—电解液泵；11—电解液槽；12—过滤网；13—进液管；14—回液管；15—机床

图6-26（b）为其加工示意图。

确定电解加工光膛的工艺参数通常是首先进行初步计算，然后通过试验进行验证完善。由于各厂的生产条件与技术水平不同，各种枪管的电解加工工艺参数也不完全相同。例如某厂电解加工自动步枪枪管光膛所用的工艺参数是

电流　1600～1800A（电流密度＝15A/cm²）

电压　10～12V

电解液浓度　12～15％NaCl水溶液

电解液压力　1～1.5MPa

电解液温度　25～45℃

两极间隙　0.95mm

（三）电解加工膛线工序

电解加工膛线所用的阴极也有两种，即固定式和移动式。它们的适用范围与光膛加工时相同。加工光膛的阴极呈圆形，而加工膛线的阴极则在阴极本体上镶嵌有突出于本体的、与膛线缠距相等的螺旋形绝缘体见图6-27（a）。绝缘体在其法向截面内大多近似矩形。图6-27(a)为某机枪枪管加工用的固定式阴极杆，其上有四条均布的螺旋形的绝缘体，其导程等于枪管膛线的缠距为240mm，阴极杆本体系黄铜材料，直径为$\phi 6.6_{-0.03}^{0}$mm，绝缘体所形成的直径为$\phi 8_{-0.29}^{-0.13}$mm，光膛直径为$\phi 7.98_{0}^{+0.11}$mm，图6-27（b）为接近加工完了的枪膛断面。

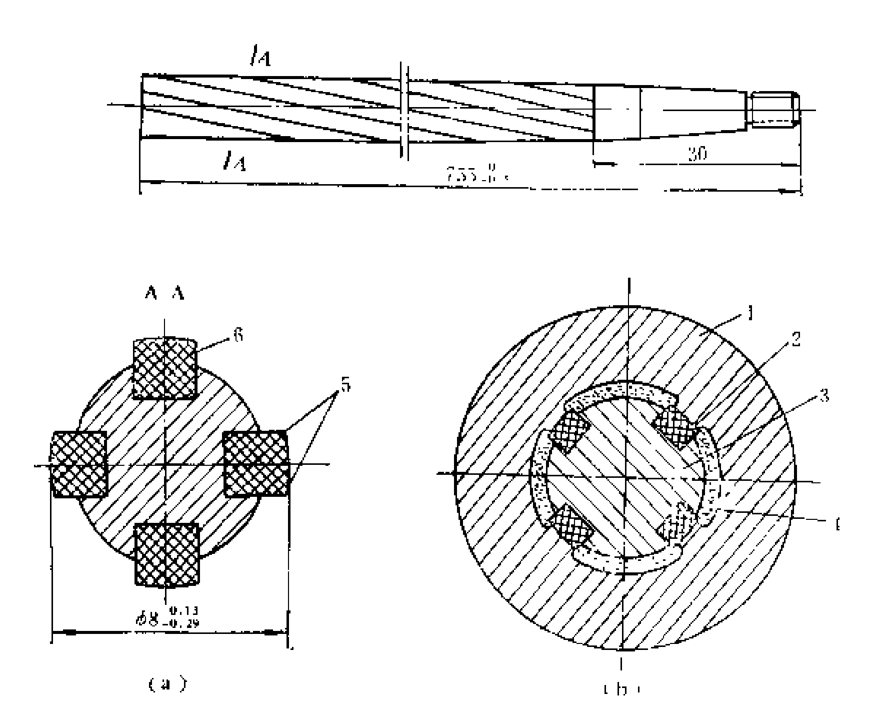


图6-27　固定式阴极杆

（a）固定式阴极杆；（b）加工时的断面形状

1—枪管；2—绝缘体；3—阴极本体；4—电解液；5—不倒角；6—绝缘体（硬橡胶）

移动式阴极比较短，在加工膛线时，需要作螺旋运动，其导程等于膛线的缠距。图6-28为某小口径火炮炮管用的移动式阴极的一种结构。

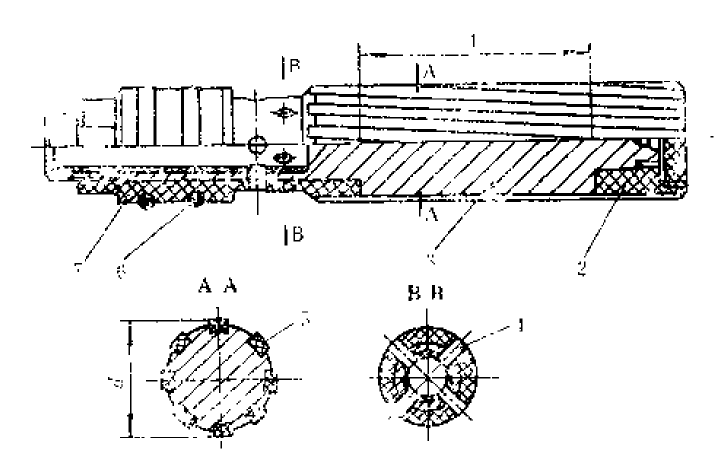


图6-28　移动式阴极结构

1—阴极工作长度；2—后导向套；3—阴极本体；4—出液孔；
5—阴极本体绝缘片；6—"O"型密封圈；7—前导向套

（四）电解加工弹膛工序

电解加工弹膛包括两方面的内容：其一是用电解加工代替部分手铰（精铰）弹膛工序（工步），以减轻工人的体力劳动，且可提高生产率；其二是在弹膛表面刻制纵槽，以减少抽壳力，提高射速，延长拉壳钩的寿命。加工时采用固定式阴极。图6-29(a)为某枪电解加工弹膛的安装图，图6-29(b)为某小口径炮电解加工弹膛表面纵向槽的安装图。需要指出的

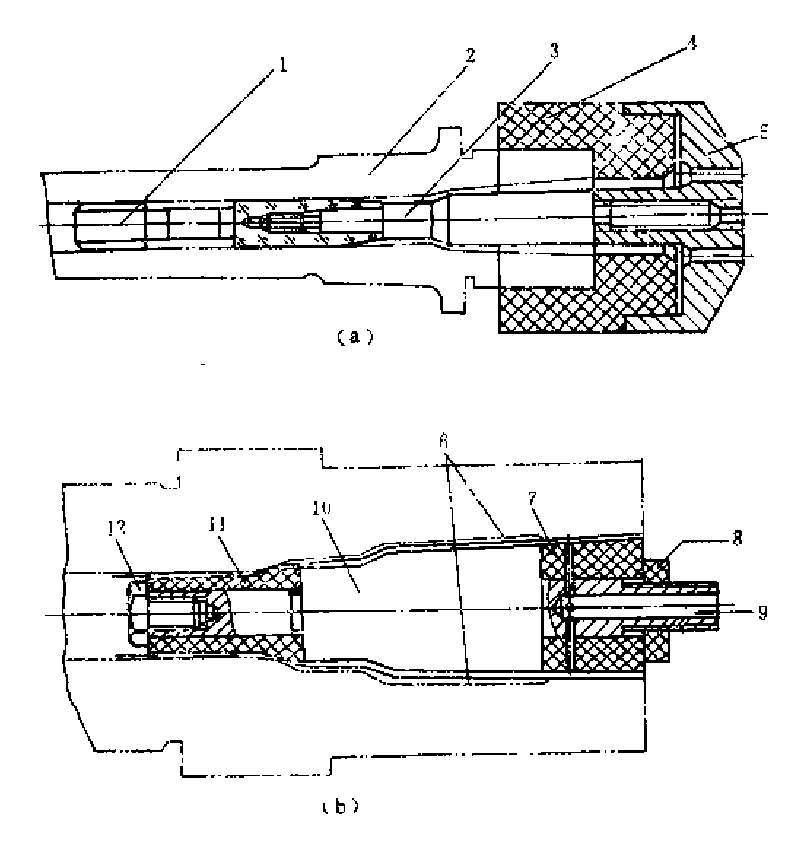


图6-29　电解加工弹膛的安装图

(a)电解加工弹膛；(b)电解加工弹膛纵槽

1—定位套（有机玻璃）；2—枪管；3—阴极（黄铜）；4—下绝缘帽（夹布胶木）；5—导电帽（黄铜）；6—加工后的纵向槽；7—前绝缘套；8—螺帽；
9—电解液进入处；10—阴极本体；11—后绝缘套；12—绝缘螺钉

是电解加工弹膛时两极间的间隙各处不是等于同一数值，而是一个变值，因此阴极的形状与尺寸，一般需由实验确定。

（五）电解加工后的终结工序

用水冲洗内膛表面残留电解生成物及NaCl溶液，用热水烫干，检验，合格者涂油防锈。

第七节 用挤压法形成膛线

一、概述

制造膛线最早的方法是切削法，即用各种拉刀拉制膛线。拉制膛线又叫拔丝，需用专用设备、复杂刀具，对工人的技术水平有较高的要求，生产率很低，拉制出一根枪管的膛线，常需一个小时左右，若采用螺旋或环形拉刀，则生产效率较高，但刀具制造特别复杂，为达到一定的生产率，所需的机床数量多，占用的厂房面积大，同时加工质量也很不稳定。拉制膛线工序往往是枪管制造中的薄弱环节，影响生产任务的完成，寻求新的加工方法要求特别迫切。

随着科学技术与生产工艺的发展，1929年德国人创造了一种特殊工具，即用带凸起的冲头拉过枪膛使凸起挤压膛壁产生塑性变形以无切屑的方法来形成膛线。由于是把冲头拉过枪膛，拉杆本身的抗拉强度与所要承受的拉力远不相称，所以拉挤法没有得到实际应用，很快就被推挤法所代替。推挤法就是用推（顶）杆将冲头推过枪膛来形成膛线，这种方法又叫挤线、挤丝。

用挤压法形成膛线有很多优点，主要是：

1．生产率高，比拉削法（拔丝）的生产效率提高50倍以上。

2．可获得较小的表面粗糙度，一般可达Ra0.4～0.1。

3．可获得较好的内膛尺寸精度。

4．由于塑性变形的结果，提高了枪膛表面的硬度，对挤线后不进行回火的枪管来说，可以增加耐磨性。

5．操作简便，要求工人技术等级较低。

6．可减少专用设备和生产面积。

7．采用硬质合金冲头，寿命大为提高。过去采用合金钢冲头，一个冲头有的只能挤几根枪管，多的也只能挤100～200根枪管，改用硬质合金冲头后，一个冲头可挤8000～10000根枪管，冲头寿命提高100倍以上。

由于用挤压法形成膛线的生产效率高、质量好、工具寿命长，所以用这种方法来制造枪管的膛线是目前最经济的一种方法。

二、用挤压法形成膛线的原理

用挤压法形成膛线的理论基础是金属的塑性变形。它是利用一个直径大于光膛内径的、其上有与膛线相对应的斜向凸起与凹槽的冲头，用推杆将其推过枪膛，使枪管内壁产生大于屈服极限而小于强度极限的拉应力，使枪管内壁产生弹塑性变形，利用其塑性变形（又叫残余变形）来形成膛线。冲头的凸起部分形成阴线，冲头的凹入部分形成阳线。图6-30为挤压膛线的变形图及其应力分布图。图6-30(a)为冲头断面图，图6-30(b)为枪管挤压变形图，图6-30(c)为挤压后枪管断面上的应力分布图。

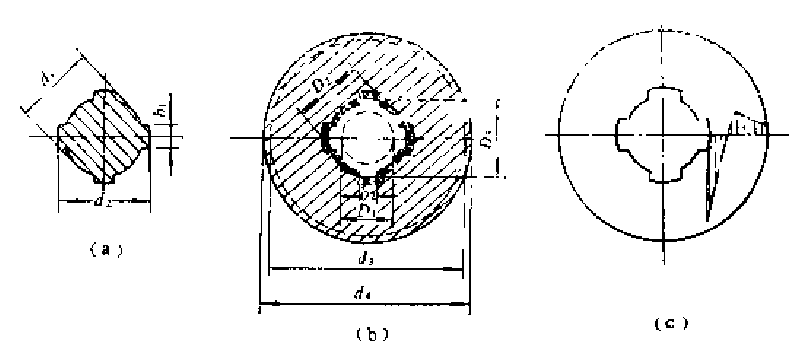


图6-30 枪管挤压膛线后的变形及其应力分布图

（a）冲头断面；（b）枪管断面；（c）残余应力的分布情况

下面是某7.62mm枪管挤压前后的数据

D_1——挤压前的光膛直径，$D_1=7.442$mm；

D_2——挤压后的阳线直径，$D_2=7.62$mm；

D_3——挤压后的阴线直径，$D_3=7.924$mm；

d_1——冲头凹槽直径，$d_1=7.67$mm；

d_2——冲头凸起直径，$d_2=8.051$mm；

d_3——挤线前枪管的外径，$d_3=22$mm；

d_4——挤线后枪管的外径，$d_4=22.1$mm；

b_1——冲头凸起宽度，$b_1=3.96$mm；

b_2——挤压后阴线的宽度，$b_2=3.85$mm。

由于冲头硬度高，在挤线时其变形量很小，可以忽略不计。故枪管在挤线后的变形值即可计算出来。

1．枪管内膛的弹性（消失）变形值

在阳线直径上　　$d_1-D_2=7.67-7.62=0.05$mm；

在阴线直径上　　$d_2-D_3=8.051-7.924=0.127$mm；

在阴线宽上　　$b_1-b_2=3.96-3.85=0.11$mm。

2．枪管内膛的塑性（残余）变形值

在阳线直径上　　$D_2-D_1=7.62-7.442=0.178$mm；

在阴线直径上　　$D_3-D_1=7.924-7.442=0.482$mm。

3．枪管外径的增大量

$$d_4-d_3=22.1-22=0.1\text{mm}。$$

从上面可知，枪管挤线的变形是由两部分组成的，即弹性变形和塑性变形。挤线时的总变形量比塑性变形量大一个弹性变形值。挤线后枪管处于残余内应力状态，其内表面受压应力，外表面受拉应力，但总的应力是平衡的，其和等于零。

光膛在挤压后所得的断面尺寸，与枪管材料的性质、冲头的尺寸，挤压前枪管内径和外径的大小以及内表面的表面状况有关。为了得到所要求的断面尺寸，必须正确地确定毛坯尺寸与冲头尺寸。由于影响断面尺寸的因素较多，它们之间的数学关系式尚未建立起来，目前仍然是根据经验来确定毛坯尺寸和冲头尺寸。

挤线时，为了使冲头通过枪膛，必须给冲头一定的挤压力（推力）。挤压力的大小与变

形位、金属的性质、冲头的形状，挤压速度和挤线时所采用的润滑剂有关。为了使挤线工作顺利进行，排除损坏工具的可能性，应该尽量减小挤压时的挤压力。不同口径的枪管，挤压时的挤压力是不同的，其数值是随着口径的增大而增大（主要是变形量与接触面积增大所致）。对于7.62mm枪管挤压力约为30～40kN，12.7mm枪管为100～110kN，14.5mm枪管为130～140kN。

为了挤出膛线，在挤压时，枪管1既作旋转运动又作轴向运动，如图6-31所示，即作等于膛线缠距的螺旋运动，而冲头4则支持在顶（冲）杆3端面上既不移动也不转动（受端面摩擦力矩所阻止），顶杆由连续支架2支持以免产生失稳弯曲。

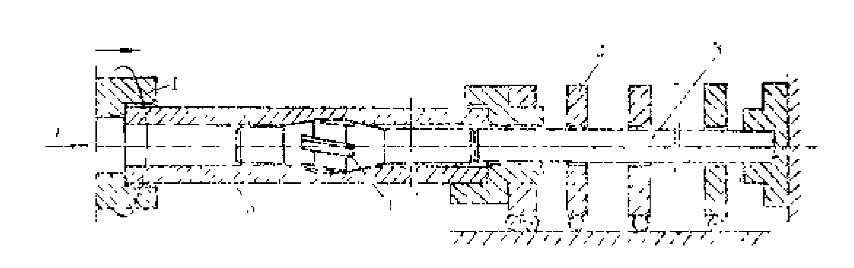


图6-31 用挤压法形成膛线简图

1—芯轴；2—连续支架；3—冲杆；4—冲头；5—枪管

三、挤压膛线用的工具——冲头

挤压膛线用的冲头（挤丝冲）有多种结构，如图6-32中的（a）、（b）、（c）所示。它们是用合金工具钢（CrW5、Cr12Mo）制造的。冲头通常有三个部分：头部、工作部分和尾部。冲头的头部包括一个锥体和一个圆柱体，圆柱体的直径略小于挤线前光膛的直径约0.06mm，它的作用主要是引导冲头顺利地进入光膛；冲头的尾部为一圆柱部分，其直径比

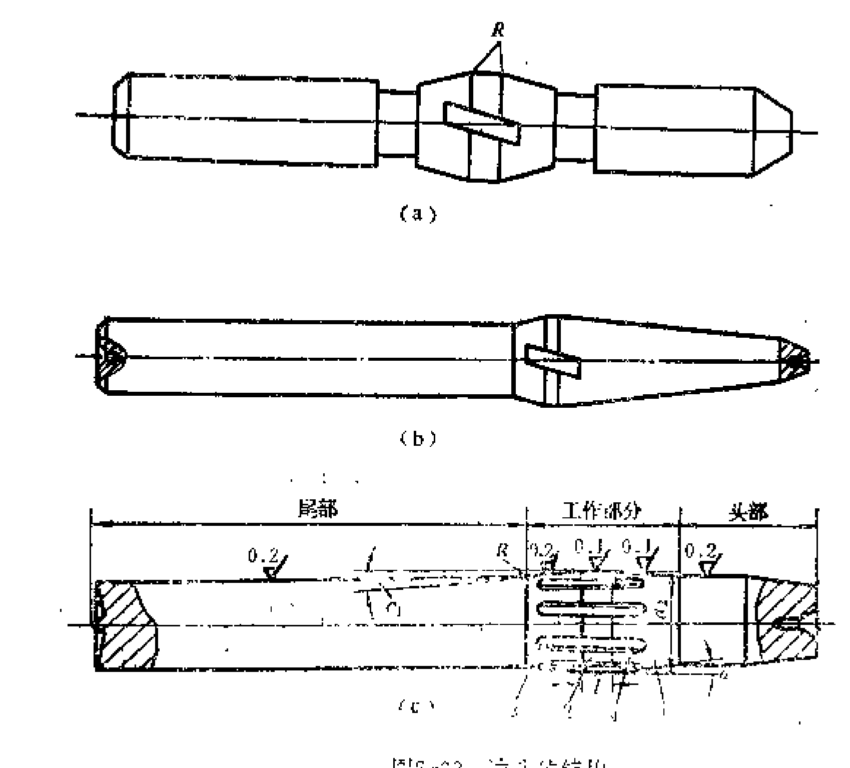


图6-32 冲头的结构

（a）、（b）7.62mm口径用；（c）大口径用

枪管阳径约小0.1mm；尾端面为一有中心孔的平面，它应与冲头轴线严格垂直。为了使冲头中心与顶杆中心相重合，且增大端面抗转动的摩擦力矩，对某些大口径冲头的尾端面可做成如图6-32(c)所示带有小锥体的形状。

冲头的工作部分包括两个锥体(前锥1和后锥3)、一个圆柱体2以及凹槽4。具体参数有：前锥半角α、后锥半角α_1、圆柱部分长度l、连接圆弧R和导程L、圆柱部分直径d_2。

前锥半角α　α的作用是使冲头逐步楔入光膛，且使变形平缓。α角的大小对冲头寿命、挤压力、枪管线膛的尺寸精度、表面质量均有很大的影响。当α角在某个适宜的数值时，可使挤压时变形缓慢，挤压力较小，枪膛表面质量较好，冲头寿命较长。若α角过小时，由于增大了冲头与孔壁间的接触面积，增大了摩擦力，不仅使挤压力增加，而且还容易使孔壁金属微粒粘附在冲头上，划伤孔壁，增大线膛表面的粗糙度。当α角过大时，挤压时光膛金属变形剧烈，不仅是挤压，而且还具有剪切、切削作用，因此挤压力增大，线膛表面质量恶化，冲头寿命降低。可见，冲头前锥半角α过大或过小均使挤压力增大，会导致冲头、顶杆等产生破断或损坏。为了防止冲头损坏或破断，除了减小冲头前锥面上的粗糙度、研磨好前锥面与圆柱部分的连接圆弧R、挤压时正确放置冲头以外，最主要的还要合理地选择前锥半角α的数值。图6-33所示为7.62mm枪管的挤压力与前锥半角α的变化曲线。为了减少挤压力，故在生产中一般取$\alpha=4°\sim7°30'$，最多的是取5°

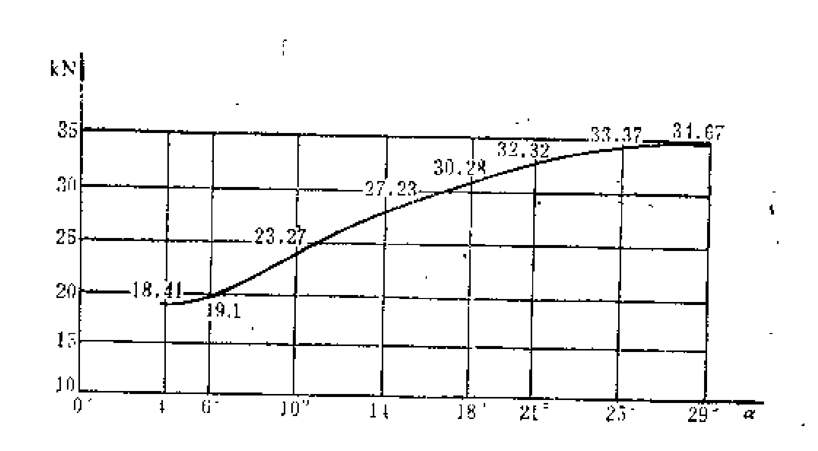


图6-33　冲头前锥半角α对挤压力的影响

后锥半角α_1　它的作用是减少摩擦，使弹性变形逐渐恢复，改善线膛表面质量。一般取$\alpha_1=\alpha$，或$\alpha_1=\alpha+(2°\sim4°)$。

圆柱部分长度l　它的作用是提高冲头寿命，改善枪膛表面质量，稳定枪膛尺寸精度。但有了它增大了挤压力，故l不能取得太长，一般为1.2～4mm。

连接圆弧R　前锥、后锥与圆柱部分相交处是两个钝角，影响使用性能，一般均需倒圆，约相切于$l/4$处。

导程L　冲头上凹槽或凸起的导程与成品枪管膛线的缠距是不相等的，一般前者要小一些，所小的具体数值，须根据试验来确定。例如7.62mm枪管膛线的缠距为240±10mm，冲头凹槽的导程为225±1mm；14.5mm枪管膛线的缠距为420±10mm，冲头凹槽的导程为390mm。

冲头的总长度一般为65～100mm，但对于7.62mm枪管用的冲头也有45mm的。

由于合金工具钢冲头寿命低，现在已为硬质合金冲头所取代。硬质合金冲头与合金工具

钢冲头相比，有下列特点：冲头总长比较短，一般为35mm；没有前导部分，工作部分前移了；冲头上凹槽或凸起的导程与枪管膛线的缠距之间的差值缩小了。例如7.62mm枪管膛线缠距为240±10mm，而冲头的导程为238_{-2}^{0}mm；14.5mm枪管膛线缠距为420±10mm，而冲头的导程为415±3mm。为什么冲头要做得比较短、且把工作部分前移呢？这主要是为了使工作部分质地致密一些，不出现疏松，防止在工作时产生粘铜现象，以致影响冲头的使用和寿命。因为硬质合金冲头在烧结前必须经过模压，如果冲头太长、工作部分在中央，则模压时中间部分压不紧，出现疏松，将冲头总长缩短，工作部分前移，问题就解决了。图6-34所示为7.62mm口径枪管用的硬质合金冲头。

根据某厂的估算，将合金工具钢（CrW5）冲头改为硬质合金（YG8）冲头，一年可为国家节约10万元。

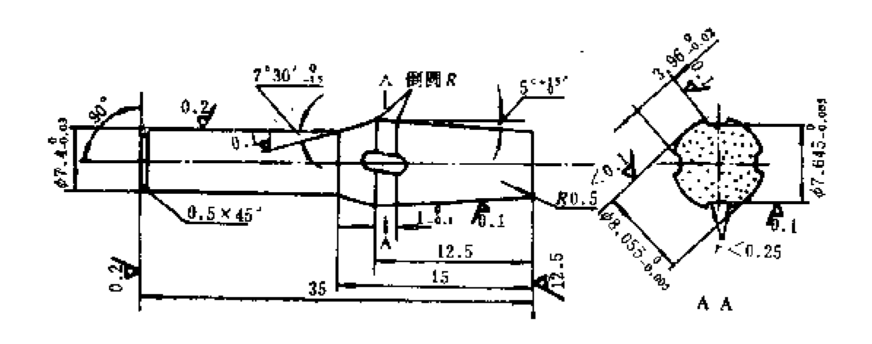


图6-34　7.62mm口径枪管用硬质合金冲头

四、挤压力及其影响因素的分析

顶杆顶着冲头通过光膛，需要有足够的推力，即挤压力。为了保证枪膛的挤压质量、冲头的寿命和防止机损事故，要求挤压力尽可能小一些。要使挤压力减小，必须找出影响挤压力的因素及各因素对挤压力影响的规律，从而采取有效措施。

影响挤压力的因素主要有：冲头的结构及其参数、枪管材料的机械性能及其尺寸、润滑条件以及挤压速度等，现逐一分析如下：

1. 冲头工作部分的影响

冲头在挤压过程中，其上受到多种力的作用，如图6-35所示。

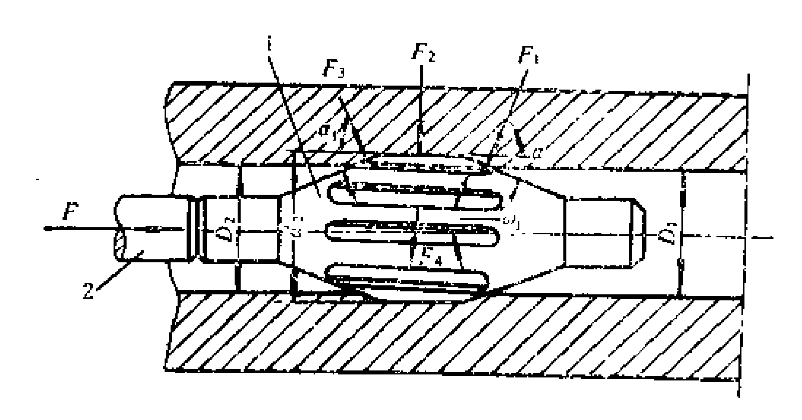


图6-35　作用于冲头上力的图解

1—冲头；2—冲杆

（1）正压力　包括作用在前锥体上的正压力F_1、作用在圆柱部分及凹槽部分总的正压力F_2、作用在后锥体上的正压力F_3和作用在凹槽侧壁上总的正压力F_4。

（2）摩擦力　它是上述各部分正压力与摩擦系数的乘积。若冲头工作部分各表面与枪膛表面间的摩擦系数f均相等，则各部分摩擦力分别为fF_1、fF_2、fF_3和fF_4。摩擦力的方向为螺旋运动方向，与冲头的相对运动方向相反。

为了使冲头挤过枪膛，挤压力F必须大于上述各力的轴向分力之和，即

$$F > F_1\sin\alpha + fF_1\cos\varphi_1\cos\alpha + fF_2\cos\varphi_1 - F_3\sin\alpha_1 + fF_3\cos\varphi_1\cos\alpha_1 + F_4\sin\varphi_1 + fF_4\cos\varphi_1$$

式中　φ_1——膛线的缠角

F_1与总变形量（d_2-D_1）的大小（图6-30）和α角的大小有关；F_2与弹性变形〔(d_2-D_3)、(d_1-D_2)〕及圆柱体长度有关；F_3与弹性变形(d_1-D_2)及α_1有关；F_4则主要与弹性变形（b_1-b_2）有关。

就冲头本身而言，影响挤压力的因素是：冲头工作部分的直径d_2和d_1、前锥半角α、后锥半角α_1、圆柱部分长度l、冲头凹槽的数目及缠角、冲头材料（硬质合金材料的摩擦系数相对较大）和表面质量等。为了使挤压力较小，主要是控制总的变形量、前锥半角和圆柱部分长度。总的变形量是由枪管形成膛线的实际需要与枪管材料强度所能允许的限度所决定的，而不是由冲头单方面所决定的，在此不作深论。冲头工作部分的其它参数，在前面第三个问题中已作了详细讨论，为了满足挤压质量要求，且使挤压力较小，其参数应按前面讨论的执行。特别要指出的是α角以5°为宜。

2．枪管硬度的影响

枪管材料硬度的高低，可以反映出材料的弹性极限（或屈服极限）和强度极限的高低。材料硬度高时，其弹性极限、强度极限也高，枪管塑性变形减小，弹性变形增加，挤压力增加。图6-36为枪管硬度对挤压力与塑性变形的影响（试验时光膛内径为7.544mm，冲头凸径为8.065mm）。

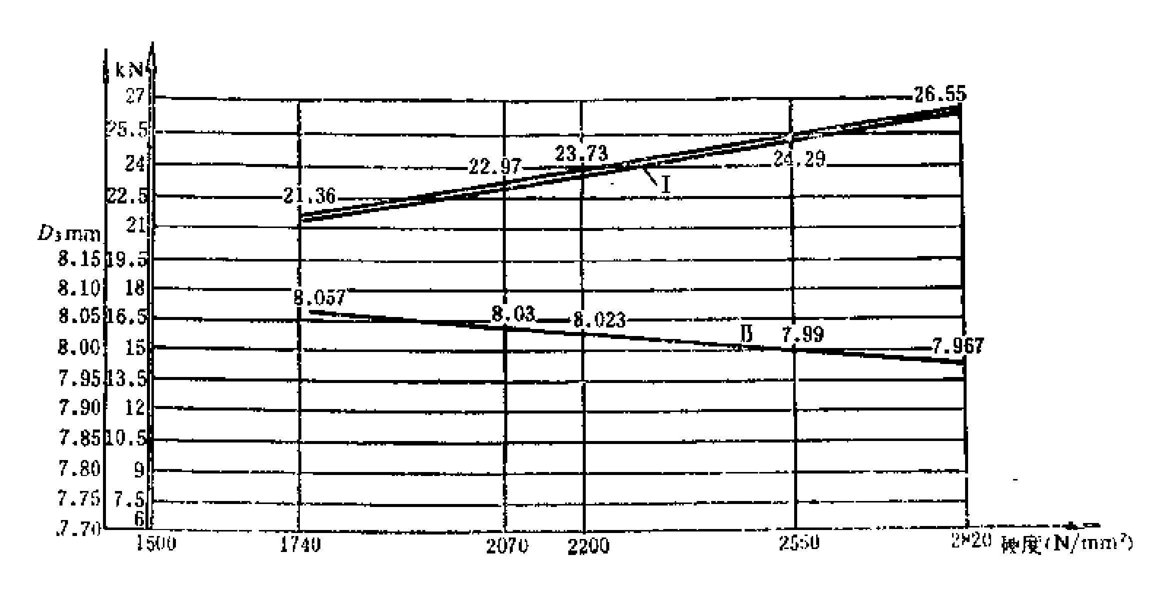


图6-36　枪管硬度对挤压力和塑性变形的影响

Ⅰ—挤压力；Ⅱ—阴线直径

由图可见，用一个冲头挤压硬度不同的枪管或挤压沿枪管全长硬度不同的枪管时，所得的枪膛断面尺寸是不同的。当硬度相差较大时，甚至使枪膛断面尺寸超过公差而报废。

为了保证得到所要求的枪膛断面尺寸，要求沿枪管全长的硬度要一致，各枪管之间的硬度要一致。但是在实际生产中要求每根枪管的硬度达到一致是不可能的，若硬度变化范围规定得很小，便会增加热处理的困难，提高生产成本。要解决各枪管间硬度一致的问题，通常是采用分组法，即在枪管所要求的硬度范围内，按硬度的高低分为几组，不同硬度组的枪管，选择不同的冲头直径，这样，不同硬度的枪管，通过挤压，其枪膛尺寸便能基本达到一致。要求沿枪管全长硬度一致，也是很难达到的。通常应在枪口部和枪尾部两处检测硬度，当两处硬度不同时，应按平均硬度选择冲头的尺寸。

表6-6所示为冲制口径14.5mm的枪管时按硬度分组与选择冲头的情况。

表6－6　14.5mm枪管硬度的分组情况

硬度组别	印痕直径（mm）	硬度（N/mm²）	冲头凸部直径（mm）
1	3.2～3.3	3630～3410	15.22
2	3.3～3.4	3410～3210	15.21
3	3.4～3.5	3210～3020	15.20
4	3.5～3.6	3020～2850	15.19
5	3.6～3.7	2850～2690	15.18
6	3.7～3.8	2690～2550	15.17
7	3.8～3.9	2550～2410	15.16
8	3.9～4.0	2410～2290	15.15

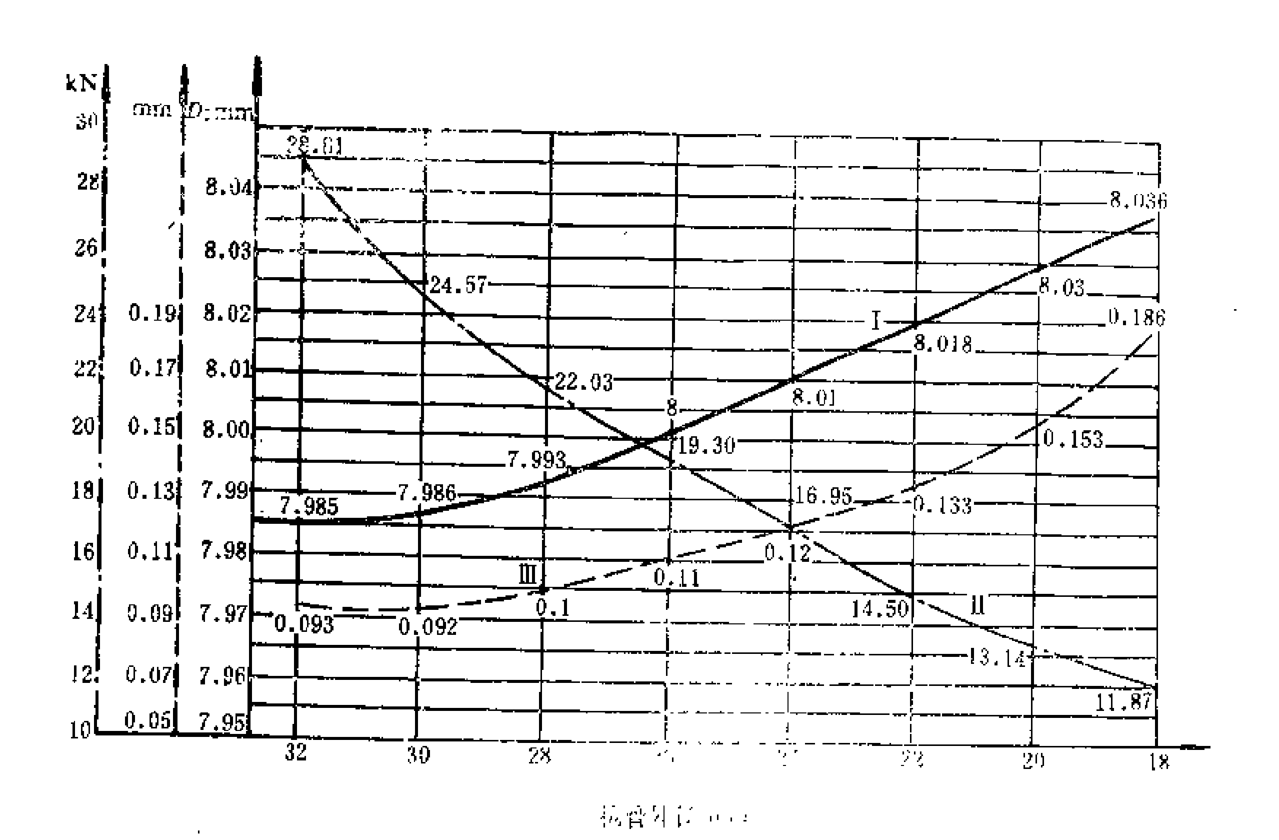


图6-37　枪管外径的变化对挤压力与阴线变形的影响

Ⅰ—阴线直径；Ⅱ—挤压力；Ⅲ—外径扩大量

3．枪管外径、内径的影响

当枪管内径一定时，增大枪管的外径，则挤压力随之增大，塑性变形减小而弹性变形增加，如图6-37所示（试验时光膛内径为7.544mm，冲头凸径为8.052mm）。

由图可见，为了减小挤压力，在挤线之前安排外圆加工，以除去一部分加工余量；同时还应注意，枪管外径沿全长若有变化，将导致挤线后枪膛尺寸产生变化，若枪管外部存在局部突起或加厚，将会使这些地方的枪膛尺寸在挤压后产生局部收缩，从而影响弹丸在膛内的运动，增大火药气体压力，有时甚至使枪管产生局部膨胀或破裂。为了保证挤压后内膛尺寸一致，在挤线前枪管外径最好是圆柱形的，如果难于做到这一点，外径尺寸的差别也不能过大。经验证明，7.62mm口径的枪管挤线前其外径的变化不要超过12%。

当枪管外径保持不变、冲头外径一定时，若枪管内径产生变化，则挤压力与塑性变形均要发生变化。枪管内径减小，则挤压力与塑性变形均要增大，如图6-38所示（试验条件与上面相同）。

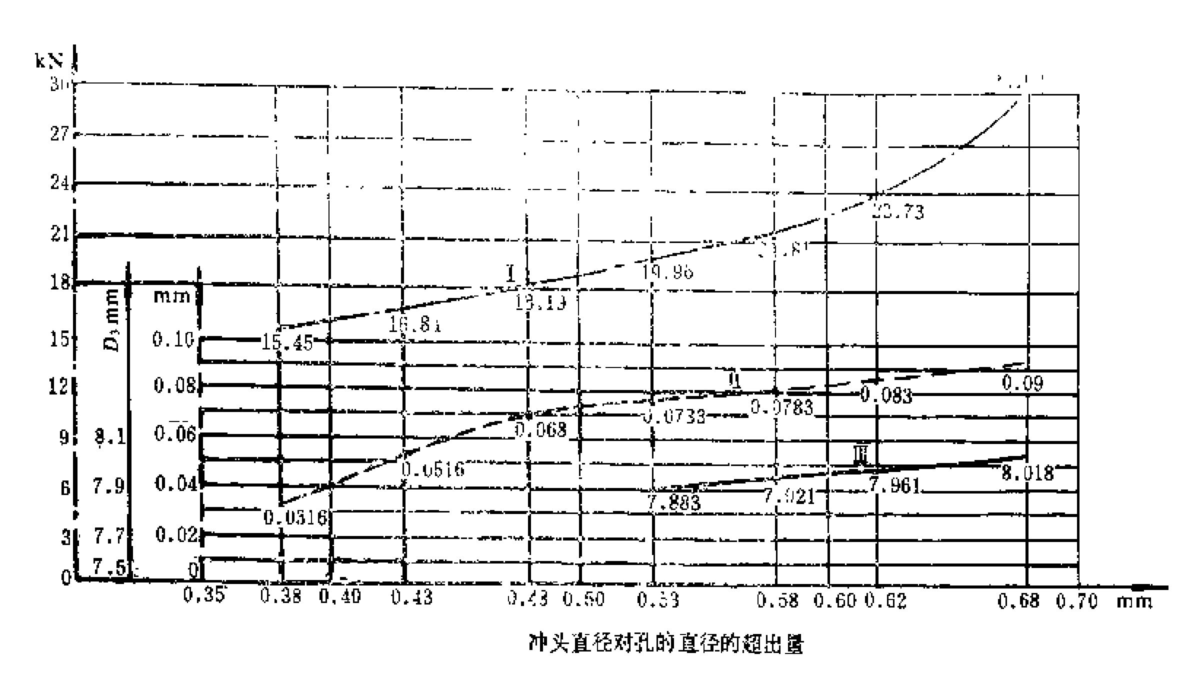


图6-38　枪管内径的变化对挤压力与塑性变形的影响

Ⅰ—挤压力；Ⅱ—枪管外径的扩大；Ⅲ—阴线直径

由图可知，用同一冲头挤压内径不同或沿长度方向上内径有变化的枪管时，所需的挤压力和所得到的枪膛直径是不相同的，枪管外径也要发生变化。为了获得挤压后所要求的枪膛直径，在挤压前必须加工出比较精确的光膛。

4．润滑剂的影响

挤压膛线时，被挤压表面与冲头之间应有润滑剂。润滑剂的性能与种类对挤压力与挤压后的表面质量有很大影响。如果被挤压表面与冲头之间没有润滑剂或润滑剂的性能不良时，不仅会使挤压后的枪膛表面质量降低，产生多种疵病，同时还会使挤压力急剧增大，有时甚至使冲头卡在膛内，造成报废。性能良好的润滑剂，能在被加工表面与冲头之间形成一层薄膜，将两者隔开，以改善其摩擦条件。

对多种润滑剂，如非金属润滑剂——甘油、肥皂、塑胶等；金属润滑剂——铜、铅、铜＋铅等；混合润滑剂——铜＋肥皂等，进行试验，结果证明：金属润滑剂效果最好，液体润

滑剂效果不好，因为后者在很大的压力作用下，不能存在于冲头与被挤压表面之间，起不到应有的润滑作用。

图6-39所示为14.5mm枪管在挤线时润滑剂的种类对挤压力的影响。由图可见，用铅或铜与铅作润滑剂时挤压力比较小，且工艺上简单可靠，能满足挤压要求，故在挤线中常用铜或铜＋铅作润滑剂。

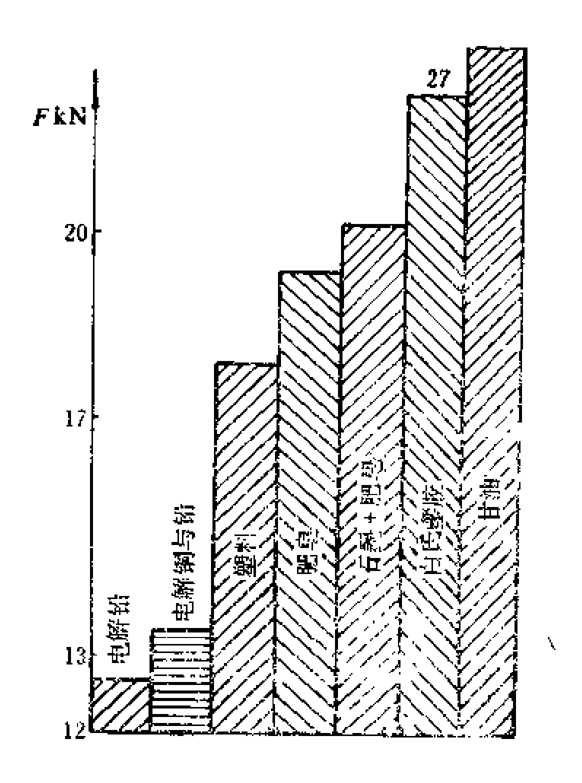


图6-39　各种润滑剂对挤压力的影响

5. 挤压速度的影响

冲头挤压光膛的速度，影响挤压力的大小。挤压速度很低或较高时均使挤压力增大。因为变形速度影响金属的弹性极限、强度极限和温度，当变形速度提高时，金属的弹性极限和强度极限均要提高，与此同时金属的温度也要升高，又会降低金属的弹性极限和强度极限。由于变形速度对上述两方面的综合影响，所以表现出在某个速度范围内挤压力比较小。这个较小挤压力的挤压速度范围一般为0.6～1.2m/min。

此外，光膛的表面粗糙度，特别是铰孔后留下的横向刀痕对冲头的挤压工作和挤压后枪膛的表面质量有很大的影响，因此必须除去。过去老的工艺，在精铰孔之后安排梳形拉刀拔光枪膛工序，以除去铰孔留下的横向刀痕，使之变成沿膛线的螺旋刀痕。现在由于有的枪管采用了电解加工（消除了横向刀痕），有的枪管在热处理以前进行了大余量的挤光（压平了横向刀痕），所以横向刀痕对冲头的挤压及其挤压质量的影响已不存在或不突出了。

最后，还要指出挤压力沿枪管全长（假定枪管是等外径的圆筒形）是变化的，其变化情况如图6-40所示。由前锥进入枪管开始，挤压力F直线上升，到圆柱部分全部进入时（即l_1点），挤压力达到最大值F_{max}；接着后锥体进入，由于其上正压力的轴向分力与挤压方向一致，故挤压力略有下降，直到后锥体全部进入为止（即l_2点）；其后挤压力保持不变；当前锥体开始脱出枪膛时（即l_3点），由于作用在前锥体上的正压力减小，挤压力又略有下

降；到圆柱体接近全部脱离枪膛时（即l_4点），由于后锥体上向前的轴向分力与圆柱体和后锥体上的摩阻力相等，挤压力便等于零；最后，只有后锥体在膛内时，作用在后锥体上的轴向分力大于其摩擦力便能自动地将冲头脱离或"射出"枪膛。

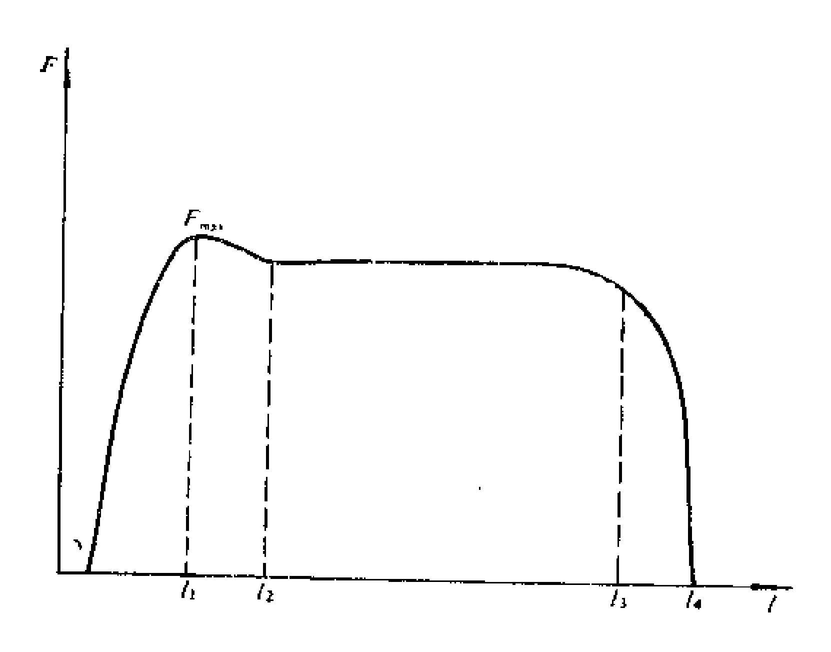


图6-40　挤压力沿枪管长度的变化

五、挤线用的机床

挤线用的机床常称挤丝机或挤线机。由图6-31已知，挤线时枪管完成螺旋运动，而冲头不动。为了完成螺旋运动，一方面要使主轴沿床面作轴向运动，另一方面还要求枪管作回转运动。完成回转运动需用靠模。常用的靠模有两种：与轴向成角度安装的直槽式靠模和带螺旋形凸起的杆状靠模。图6-41所示为一种带直槽式靠模的挤丝机传动系统图。电动机 M 带动皮带轮1及2，通过蜗杆3带动蜗轮4，经丝杠5与螺母11带动主轴支架6及安装在主轴上的枪管作纵向运动。当支架6移动时，齿条7上的滑块8在槽式靠模9的槽内滑动，将运动传给齿条7，再经齿轮10使安装在主轴上的枪管作回转运动。当挡铁12碰上电磁开关14时，电机即反转，使支架后退；当挡铁12碰上开关13时，电机的电门关上，机床即停止工作。更换枪管之后，一按电钮机床又开动了。

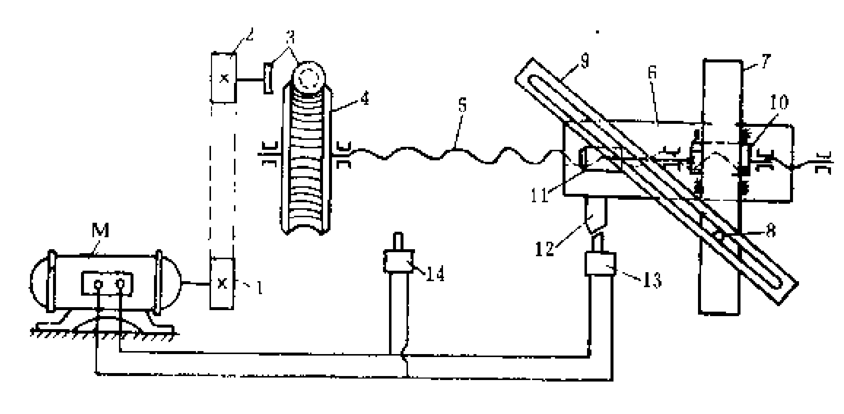


图6-41　挤线机的传动系统图

在挤线时，由于挤压力很大，而冲（顶）杆又小又长，不可避免地要产生失稳。为了防

止冲杆的失稳或折断，在机床上还应设置可以随冲杆进入枪膛而伸缩的连续支架见图6-42(a)，支架由四根圆形导柱1、连续铰链3和一系列滑动支架4组成。滑动支架4〔图6-42(b)〕中央有一起支持作用的圆孔A与冲杆2相配合，周围有四个与圆形导柱1相配合的圆孔B。当冲头被推入枪膛时，各个滑动支架即沿导柱滑动而相互靠拢，挤压完毕后，滑动支架又由机床拉杆带动沿导柱返回原位。

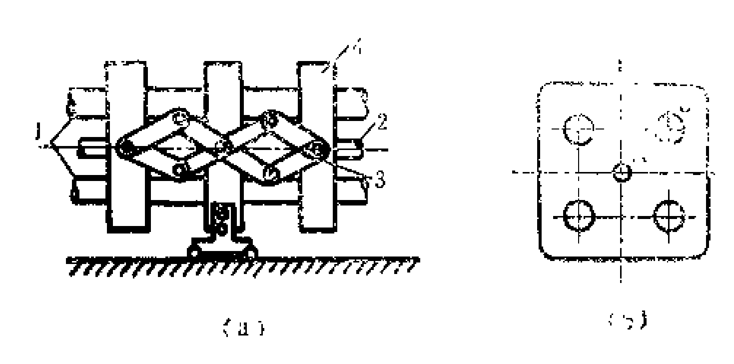


图6-42　挤线时冲杆用的连续支架
(a)连续支架；(b)滑动支架

六、挤线的准备工作和结束工作

为了保证挤线的质量，需要做好挤线前的准备工作和挤线后的结束工作。

(一)挤线前的准备工作

1．对枪管光膛进行质量检验　挤线前枪管内膛必须达到规定的表面粗糙度(一般为Ra 1.6～0.8)和所要求的尺寸精度。

2．按硬度分组　以便根据枪管的硬度选择冲头，使挤压后的枪膛尺寸达到一致。

3．碱煮去油　以便在光膛表面覆盖一层金属润滑剂。从去油后到覆盖金属润滑剂中间的时间间隔不能过长，一般不超过2～3h。

4．覆盖金属润滑剂

对于口径在12.7mm以下的枪管采用化学置换法进行接触覆铜，对于口径在14.5mm以上的枪管采用先接触覆铜，然后电解镀铅。接触覆铜常称着铜。覆铜溶液的成分如下

$CuSO_4$　12%
H_2SO_4　7%
$SnCl_2$　1%
H_2O　80%

覆铜液与枪膛表面的置换反应为

$$Fe+CuSO_4 \longrightarrow FeSO_4+Cu\downarrow$$

因此，硫酸铜与铁接触时，铜便覆盖在枪膛表面上。

覆铜液中的硫酸是用来促进置换反应的，而$SnCl_2$乃是强烈的还原剂，用以防止铜变为氧化铜，降低其润滑作用。

覆铜的方法有两种：一种是涂擦覆铜法，就是在铜通条上穿上脱脂纱布或绒布，浸上覆铜液，让其迅速地通过枪膛表面，其后将纱布或绒布转动往复拉擦一、二次，以使覆铜层完整而又均匀一致；另一种是灌注覆铜法，就是用定量的覆铜液灌入并让其流过枪膛，于是在枪膛表面上便覆上了一层铜。

覆上铜层的光膛，一般要再涂上一层肥皂液，以提高润滑效果，天热时，肥皂液中还可加植物油。从覆铜至挤压间隔一般不应超过2min。

为了改善润滑条件，在合金钢冲头上除擦净外，还要进行接触覆铜，然后再涂上凡士林。对于硬质合金冲头，为了防止覆铜液对冲头工作部分的腐蚀，不进行接触覆铜，只涂上凡士林。为了使冲头在挤压后得到冷却，挤线时须准备几个冲头交替使用。

对于口径14.5mm以上的枪管，首先在膛面上接触覆铜，中间不间断，随即放入电镀槽中（溶液成分为HF、H_3BO_3、$PbCO_3$）进行电解镀铅。

（二）挤线后的结束工作

1．拉光阳线　由于沿枪管全长的硬度不一致以及接触覆铜在内膛表面上的厚度不均，枪管在挤压膛线后，内膛产生波纹。这时可用外径已镀铬的光冲头（图6-43）沿膛线作螺旋运动，拉过枪膛来修整阳线。由于拉挤阳线是在挤线之后立即进行的，挤压余量小，且内膛表面已进行过接触覆铜、涂肥皂液等处理，故可不再进行接触覆铜了。例如14.5mm枪管的工艺过程就是这样安排的，当然，对有的枪管来说，挤线后不一定进行或不立即进行拉挤阳线的工序。

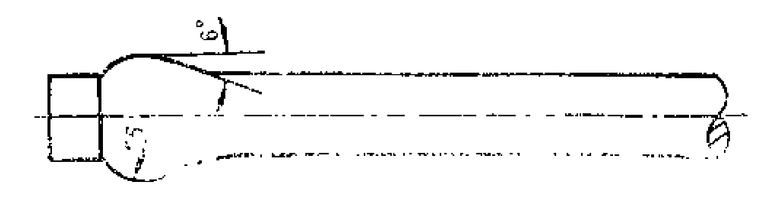


图6-43　修整阳线所用的光冲头

2．去铜去铅　所有枪管，在挤线前都要进行接触覆铜，在挤线后均应将铜去掉。去铜的方法有两种：其一是加热氧化法，就是利用回火温度将枪管内表面上的铜层烧掉；其二是化学除去法，就是将枪管放入铬酐和硫酸铵的溶液中将铜除去，它适用于挤线后不进行回火的枪管。

对于口径在14.5mm以上的枪管，首先应该去铅，去铅是在氢氧化钠和铬酸钠溶液中进行的，然后去铜。

3．回火　为了消除挤线后存在于枪管断面上的内应力，并使枪膛尺寸稳定下来，在挤线后需要进行回火。如果这种内应力不予消除，那么在以后的外圆加工过程中由于切去了表层金属（部分地除去了外层金属对内层金属的压缩作用），破坏了内应力的平衡，将使枪膛尺寸增大，同时还可能使枪管发生弯曲。14.5mm枪管，挤线后要在井式电炉中进行回火，其规范是：加热到570～600°C，保温2h，随炉冷却至300°C，然后在空气中冷却。对于步枪、冲锋枪枪管，由于挤线后外表面的加工余量不很大，车削后对内膛尺寸的变化亦不大，且膛线的精加工是在外圆的精加工之后进行的，可以起到修正内膛尺寸的作用，故对这类枪管在挤线后可不进行回火。

七、挤压膛线过程中常见的疵病

1．膛线表面有斑点　主要是由于光膛表面的接触覆铜的厚度不均匀或光膛表面产生锈蚀所造成的。

2．膛线表面产生擦伤（习称轻的叫毛丝，重的叫螺旋线纹）主要是由于挤压前内膛去油不良或有微量锈蚀所造成的，冲头表面粗糙度大也是造成擦伤的原因之一。

3．膛线表面有波浪纹　它是由于机床或夹具的运动部分发生磨损，使配合间隙增大，在工作时产生振动所引起的。枪管热处理时硬度不均匀，特别是软点处也会产生波浪纹。

八、枪管挤线后的检验

枪管在挤线后需要进行尺寸精度、形状精度和表面粗糙度的检验。

尺寸精度是采用量规进行检验，检查的内容包括：阳线直径、阴线直径、阴线宽度和膛线的缠距。

形状精度主要是用长样柱检查枪膛的直线度，对大口径枪管有的还要检查圆柱度。

枪膛的表面粗糙度一般用肉眼判定。

九、枪膛表面的精加工

形成膛线以后还要进行精加工，对阳线和阴线表面进行抛光，常称浇铅擦膛，或称擦铅或擦膛。其目的主要是修饰线膛，减小表面粗糙度，纠正线膛在制造中产生的某些疵病。为了避免修饰阴线而使阳线直径超过公差而报废，或者修饰阳线而使阴线超过公差而报废，对阴、阳线的浇铅擦膛应分别进行。

擦膛用的工具是铅棒。擦阳线的铅棒呈圆柱形如图6-44（a）。它是在一根钢制通条上浇灌一段圆柱形铅而成；擦阴线用的铅棒，是以被加工枪膛为模型铸成的，其断面如图6-44(b)所示。由于铅在冷却后体积稍有膨胀，故可得到与膛线紧密吻合的铅棒。对于某些枪管，为了保证在擦阴线时不擦到阳线，常将铅棒凹槽上的铅刨去一层，使其与阳线有较大的间隙，如图6-44(c)所示。

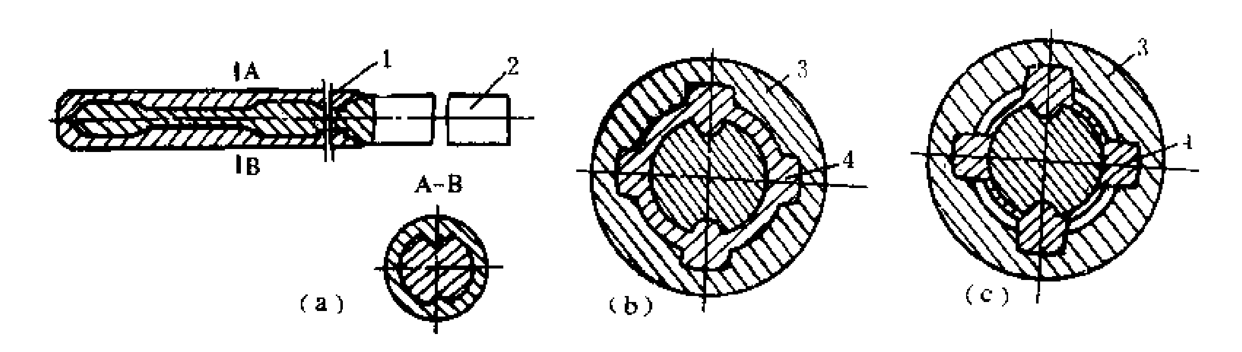


图6-44　擦膛用的铅棒

（a）擦阳线用的圆柱铅棒；（b）压铸在枪膛中的铅棒断面；（c）擦阴线用的铅棒断面

1—铅；2—通条；3—枪管；4—铅研具

为了使枪膛粗糙度纹路的方向与膛线方向一致，擦阳线时必须强迫擦阳线铅棒沿着膛线的方向作螺旋运动，在机床上是通过装有主轴的、作往复运动的滑枕和使主轴作旋转运动的靠模杆来实现的。在有的机床上，还有使枪管作周向转动的机构，使阳线擦得更加均匀。擦阴线时，装有主轴的滑枕只需带动铅棒作往复运动，而铅棒的旋转运动则由阴线导转来完成。

擦膛是在专用的擦膛机上进行，通常多用2～5主轴的立式擦膛机。

擦膛时可在铅棒上涂以由细粒金刚砂、柴油（或煤油）和变压器油制成的混合剂，这时，不仅可以减小膛面的表面粗糙度，同时还可以除去一定的余量，用以修正与提高枪膛的精度；也可在铅棒上涂以由抛光粉与润滑油制成的混合剂，这时，只能减小表面粗糙度，而不能除去余量，故不能修正与提高枪膛的精度。

有的枪管在挤线时由于尾部壁厚相对较大，所以，这一段上的枪膛尺寸小于其它部分，擦膛时须先从这部分开始。

第八节　枪管弹膛的加工

一、弹膛的加工工序及工步

弹膛一般有4～5个锥体，加工余量大，质量要求高。加工中通常用的工艺方案是：粗铰⟶半精铰⟶精铰⟶抛光。粗铰、半精铰和抛光均在机床上进行，精铰一般由手工完成。弹膛加工的定位基准是枪膛表面和枪管尾端面。各工序在工艺过程中的位置，须按一定的规律进行安排。

弹膛的加工余量大，不仅要分为多个工序加工，而且每个工序均包含有若干个工步。图6-45(a)为弹膛加工各工序加工余量分配图。根据长期的实践证明，最合理的工序及工步是：

1．在机床上粗加工第一和第二锥体（即粗铰，也叫预加工），如图6-45(b)所示。先用扩孔钻切除第一锥体上的大部分余量，然后用双齿、三齿或五齿铰刀对第一和第二锥体进行铰削。

2．在机床上半精铰第一和第二锥体，粗铰第三和第四锥体，如图6-45(c)所示。通常是用多把五齿或六齿铰刀加工第一、二锥体（图中的1、2、3），再用多把五齿或六齿铰刀加工第三、四锥体（图中的4、5）。

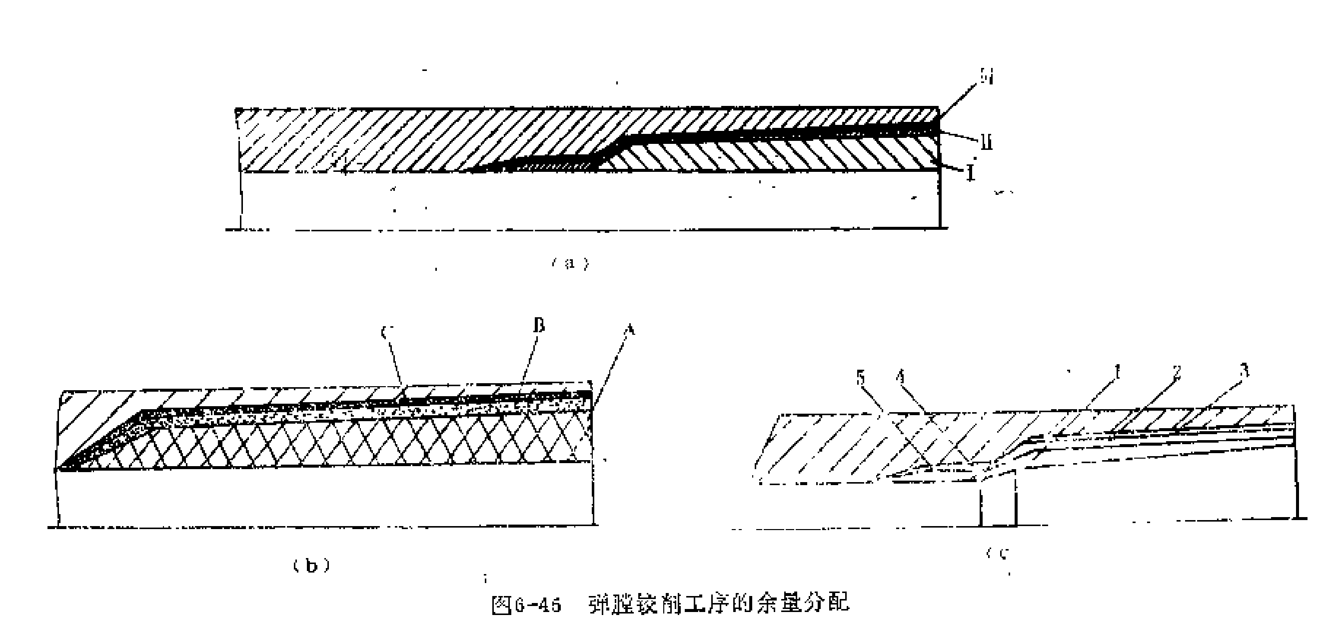


图6-45　弹膛铰削工序的余量分配

（a）弹膛三次铰削工序的余量分配；（b）弹膛粗铰时的余量分配；（c）弹膛半精铰时的余量分配

Ⅰ—粗铰；Ⅱ—半精铰；Ⅲ—精铰；A—扩孔；B—第一次铰；

C—第二次铰；1、2、3—半精铰；4、5—粗铰

3．弹膛各锥体的手工精加工（即精铰）。先用多把五齿、六齿或八齿铰刀精铰第一、二锥体，再用多把五齿、六齿或八齿铰刀精铰第三、四锥体。其中最后一把铰刀为负前角铰刀，起刮光作用。对于有五个锥体的弹膛，最后还要用十二齿铰刀铰削第五锥体。

4．弹膛的抛光。主要是抛光第一锥体，是用锥形木棒外裹细砂纸进行的，有时候也采用绒布或皮革包于木棒之上，外涂抛光粉和润滑油进行抛光。

由于采用设计基准作为定位基准，合理地安排工序及工步，加工余量一步一步地减小，加工精度逐渐得到提高，最后还要进行压光（刮光）与抛光，这样的工艺安排是能够保证弹膛的加工质量的。

二、弹膛加工的刀具

弹膛加工的刀具种类较多，有双齿及三齿扩孔钻，有二、三、四、五、六、八、十、十二齿等多种双锥体及单锥体铰刀。图6-46所示为几种弹膛加工用的刀具。由图6-46(c)可见，铰刀由导向部分1、切削部分2和刀柄3组成。

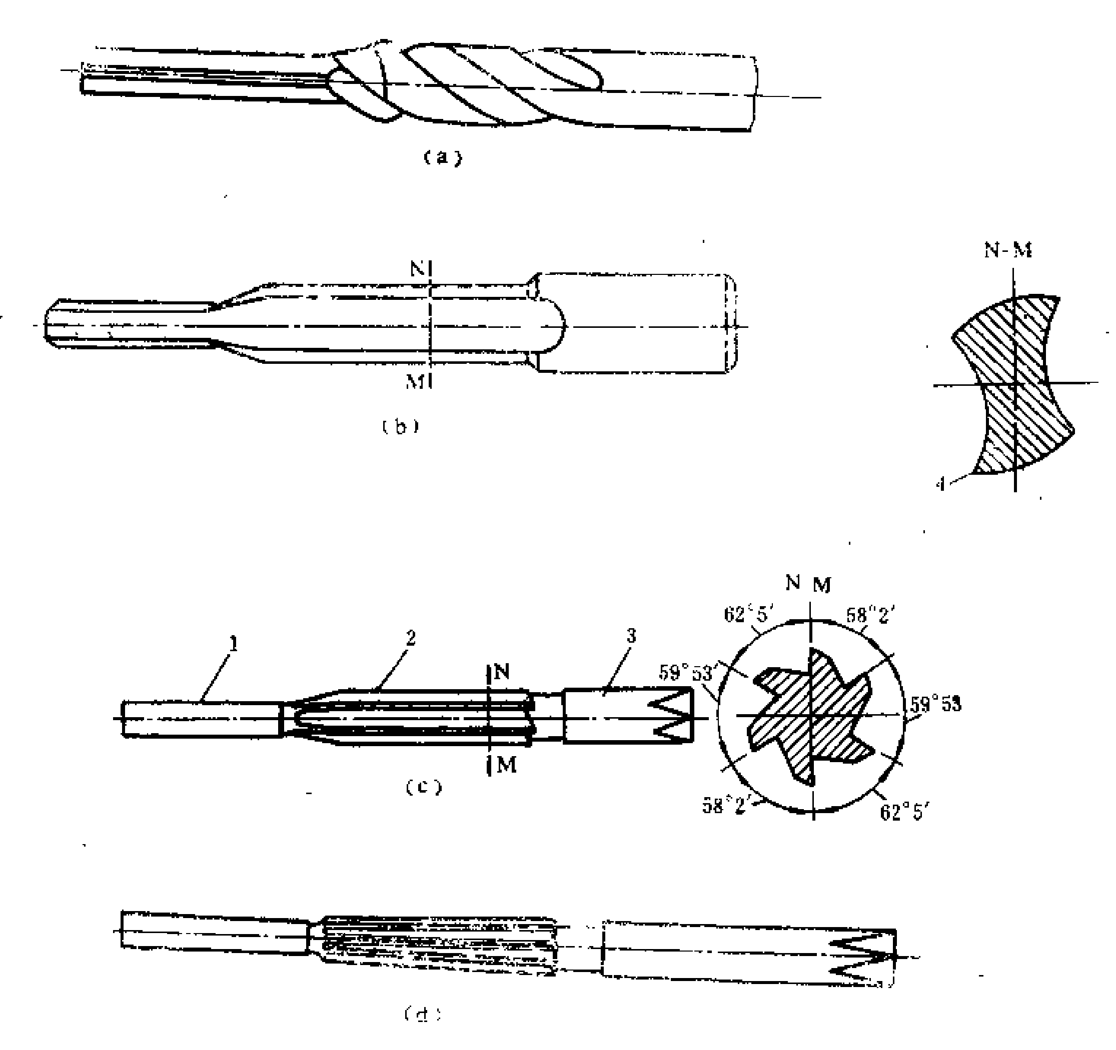


图6-46 几种弹膛加工用的刀具

(a)双齿扩孔钻；(b)双齿铰刀；(c)六齿精铰刀；(d)十二齿铰刀

1—导向部分；2—切削部分；3—刀柄；4—切削刃

导向部分 它伸入枪膛，与枪膛相配合，保证铰刀的径向定位，直径与枪膛直径相同，尺寸精度为f7，加工口径为7.62mm的枪管长度为35～45mm，加工大口径长度为40～100mm。

切削部分 一般带有同时切削两个锥体的刃口，对两个锥体同时加工，但也有只带一个锥体的刃口，例如第五锥体铰刀和某些第一锥体铰刀。铰刀的锥度与被铰削锥体的锥度相同，切削部分尺寸公差的确定与枪膛铰刀相同，对于精铰用的铰刀其尺寸公差不应超过0.02mm。

刀柄 用于夹持和定位，有圆柱形的、圆柱形带方头的以及圆锥形的。

弹膛第一、二锥体的加工多用双齿、五齿或六齿铰刀，第三、四锥体的加工多用六齿铰刀，第五锥体的加工用十二齿铰刀。用齿数较少的铰刀可切除大的余量。通常对双齿铰刀规定的直径加工余量为0.15～0.5mm，对五齿铰刀则为 0.03～0.08mm，对负前角铰刀为0.02mm。

在多数情况下，精铰刀的刀齿在圆周上做成不等齿距，这样可以有效地消除由于材料中有硬点等所引起铰刀的周期振动在弹膛表面上出现的纵向刀痕，见图6-46(c)。

为了保证铰刀的轴向定位，通常采用端面经过研磨的定位圈见图6-47。铰削前先将定位圈在铰刀上的位置调整好，然后用螺钉紧固在刀柄（杆）或铰刀齿的圆柱部分。铰削时，当定位圈与枪管尾端面相接触时，铰刀进入弹膛的深度便得到了精确的限位。

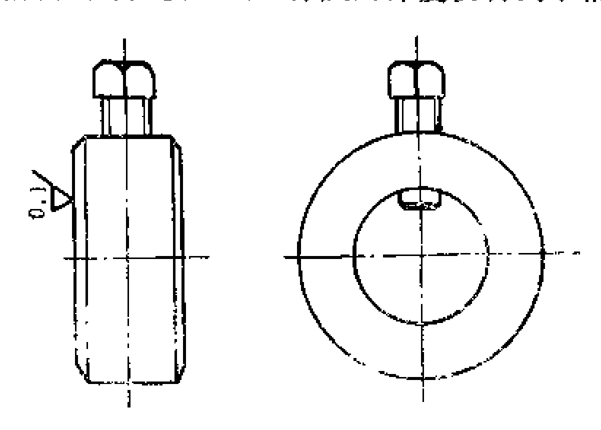


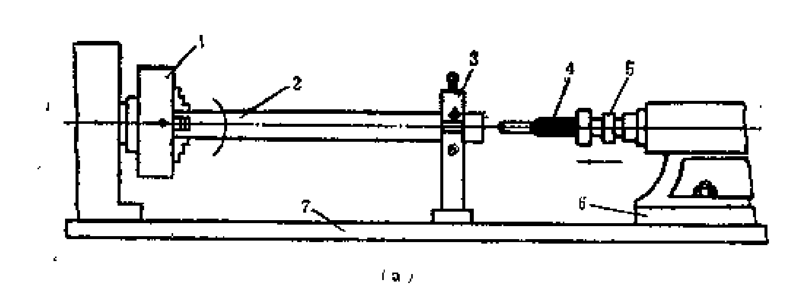
图6-47 定位圈

铰刀可用碳素工具钢（T12A）、也可用高速钢（粗铰用）或模具钢（CrW5，用于半精铰和精铰）制造，经淬火及低温回火，HRC62～65。

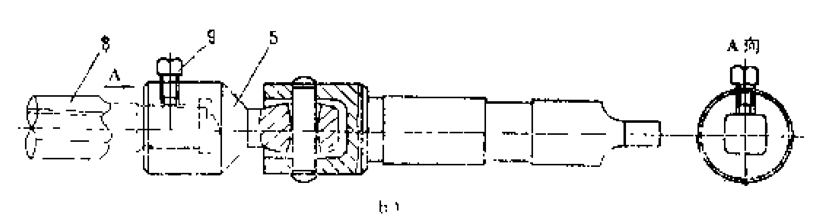
三、弹膛加工用的机床

铰削弹膛用的机床，在国内主要有两种：

1．普通车床 加工时，枪口端夹持在主轴卡盘1内，见图6-48（a），枪尾部夹持在固定



（a）



（b）

图6-48 在车床上铰削弹膛

（a）铰削加工图；（b）浮动接头

1—卡盘；2—枪管；3—支架；4—铰刀；

5—浮动接头；6—尾架；7—床身；8—铰刀；9—螺钉

支架（中心架）3中，机床尾架上装有能够浮动的接头5，铰刀柄装于接头上，实现浮动联接，以弥补刀具轴线与枪管轴线之间的误差。主轴旋转完成主运动，铰刀通过尾座螺杆手动完成进给运动。润滑冷却液则从主轴后端通过主轴孔、枪膛送至切削刃。用这种机床铰削弹膛，不需特殊的工艺装置，且易于保证铰削质量，但是生产率低，一般用于生产量不大的矢口径枪管的弹膛铰削。

2. 六角车床，加工时枪管安装在主轴卡盘内，铰刀安装在六角刀架上（包括一个工序所用的全部铰刀及扩孔钻），枪管随主轴回转，铰刀由手动送进。粗铰时，枪管装在主轴卡盘内可以浮动，精铰时铰刀装在浮动接头上实现浮动。这种机床铰削弹膛的生产率较高，目前广泛应用于大批、大量生产的小口径枪管中。

在国外枪管弹膛的铰削采用专用机床，例如立式十轴半自动铰床，在这种机床上可以完成全部的弹膛铰削工序，生产率很高，目前我国仍在研制，尚未应用于生产。

在铰削弹膛时，用植物油（菜油或豆油）作润滑冷却液可得到很好的效果。

四、弹膛加工后的检验

弹膛加工后均要进行尺寸、形状、位置精度和表面粗糙度的检验。由于弹膛的尺寸很多，所以检查尺寸的量规也很多。检查尺寸精度时，常用三种限界量规：刻线量规〔见图6-49(a)，仅表示弹膛第一锥体末端的刻线量规〕、带凸起的量规〔见图6-49(b)，仅表示弹膛第二锥体末端带凸起的量规〕和带台阶的圆锥量规。在所有情况下，被检验尺寸的正确性要由枪管尾端面对量规的检验部分的位置来判断。例如在用刻线量规时，枪管尾端面应该在刻线之间；而在使用第二种量规时，枪管尾端面就要和通过量规凸起端面接触并和不通过量规凸起端面形成一间隙；最后当使用第三种量规时，应该使枪管尾端面在台阶范围之内。以上三

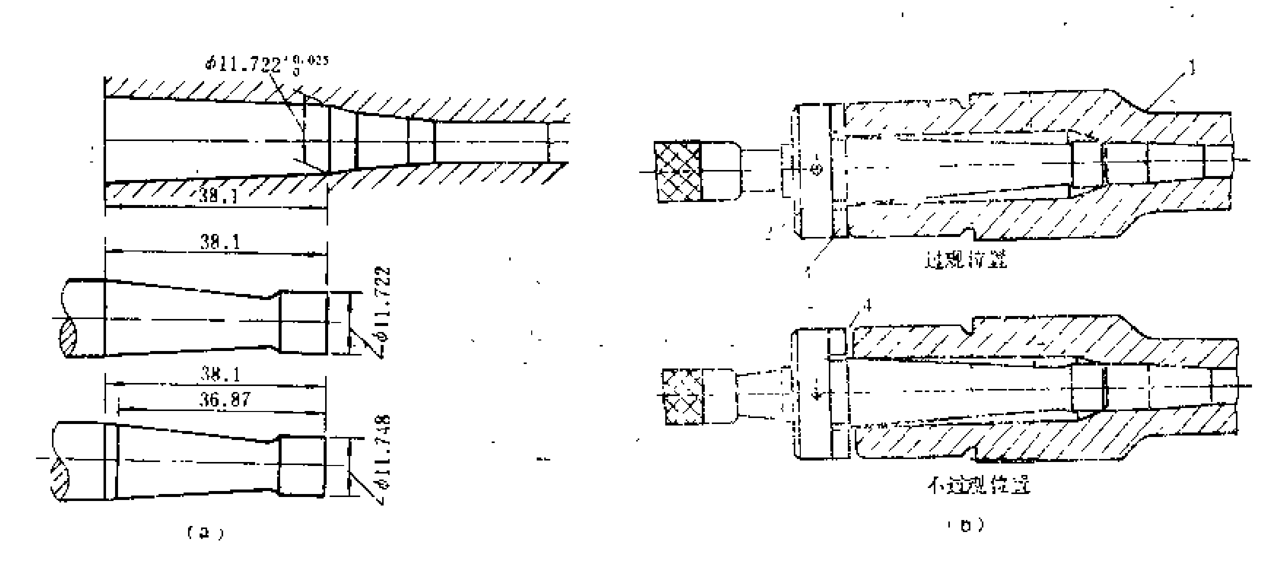


图6-49　检验弹膛尺寸精度用的两种量规

（a）检验弹膛用的刻线量规；（b）检验弹膛用的带凸起量规

1—枪管；2—量规；3—接触；4—有间隙

种量规以第二种量规检验精度较高，最为适用。

弹膛形状的检验是用不通过量规检查第一锥体的圆度，使用这种量规时，要从几个方向对弹膛进行检验。

弹膛位置精度的检验，指的是弹膛各锥体和线膛的同轴度，它只有通过量规见图6-50，当量规插入弹膛后，它的凸缘应抵在枪管的尾端面上不透光也不摆动。

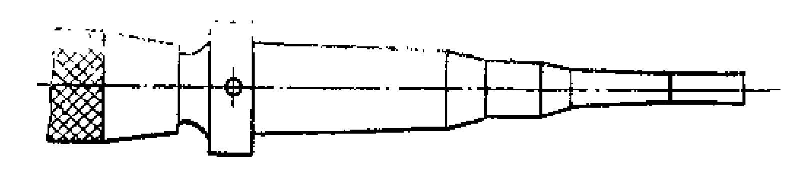


图6-50 检验弹膛各锥体同轴度的量规

弹膛表面粗糙度的检验是用肉眼观察来判定。先将反光样板放入弹膛内，使枪管绕轴线旋转，让灯光照在反光样板上，视力集中在反光样板的反射面上，即可看出弹膛内部有无缺陷。一般常见的缺陷有：工具纹、斑点、凹痕、粗刀纹、直条纹等。应根据选定缺陷限度样品来进行判定是否合格。

第九节 枪膛的校直

一、概述

枪管内膛的校直与枪管毛坯的校直一样，对枪管的机械加工具有非常重要的意义。枪管内膛是枪管外圆加工的基准。内膛的直线度不仅直接影响着内膛加工的质量（电解加工的质量、镀层的均匀性和形状精度等），而且还决定着枪管外圆车削工序的成果（与内膛的同轴度）。枪管在深孔钻削以后的加工过程中，根据口径和个别工序的特点，需要进行5～8次的校直。各次校直的作用分述如下。

毛坯校直后，枪管处于内应力平衡状态。钻深孔以后，破坏了内应力的平衡，枪管会发生弯曲，为了使外圆与内膛有一定的同轴度，在粗车外圆之前要进行校直。

枪管在粗车外圆之后，又破坏了内应力的平衡，要产生弯曲，在热处理之后，枪管也要发生弯曲，为了保证电解加工光膛的质量，在电解加工之前要进行校直。

挤压膛线还要给枪管特别是薄壁枪管带来弯曲，同时，在挤线后内膛加工暂告一段落，随之便是外部车削，为了使外圆与内膛同轴，在挤线后要进行校直。

在外部车削过程中，虽然使用了中心架，但由于破坏了内应力的平衡，枪管要发生弯曲，故在一系列车削外圆的过程中要安排多次校直。

为了使线膛能够均匀地镀上一层铬，枪管在镀铬之前应进行校直。

枪管校直是在手压调直机上或压力机上进行的，前者用于小枪管的校直，后者用于大枪管的校直。

校直工序的最大困难和复杂处是确定弯曲的地点和方向。通常确定弯曲的方法有三种：阴影法、长样柱检验法和光学仪器法。在枪管生产中用得最多的是阴影法。用这种方法校直枪管的质量与生产率完全取决于校直工人的经验与技巧。

二、枪膛的阴影校直法

枪膛的阴影校直法是将枪膛正对带有遮光板的光源，由于遮光板遮去了一部分应射入枪膛并经反射而入人眼的光线，于是在枪膛上出现了阴影，根据阴影的外形来确定弯曲是否存在，判定弯曲发生的位置和方向，从而便可“对症下药”地将枪膛校直。

检查之前要把枪膛擦净，将枪管放在手压调直机上〔见图6-51(a)〕或支架上〔见图6-51(b)〕，并以其一端对准带有荧光源的遮光板(或窗框)，置眼于距枪管端面5～7cm处，并将

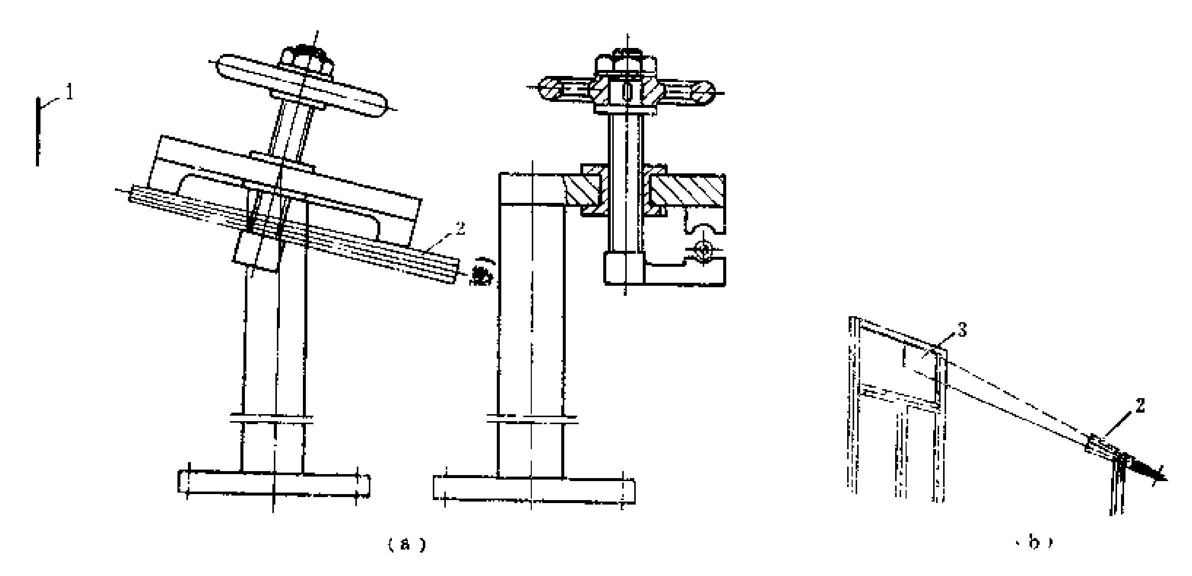


图6-51 阴影校直方法

(a)在手压调直机上校直枪管；(b)以窗框作遮光板校直枪管

1—遮光板；2—枪管；3—光源

视线集中在枪膛表面的前半部，然后逐步升起枪管靠遮光板的一端，一直到枪膛下部表面不再有遮光板的投影为止（此时从枪管尾端看去，只能看到遮光板不大的一个边，但可以完全看到枪口圆周，而且此时枪膛上出现的阴影轮廓的顶部是与枪口端面相接的）。根据远视法则，圆柱在肉眼看来总是圆锥，所以在直的枪膛表面上阴影轮廓就成了一个底朝着观察者眼睛的三角形，如图6-52所示。三角形的高h（图6-53）为

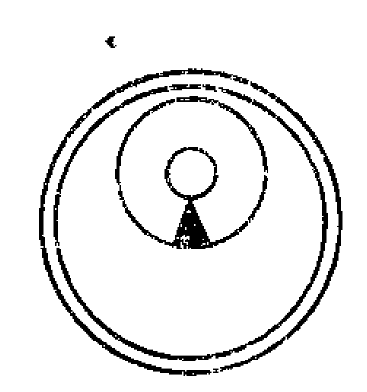


图6-52 三角形阴影

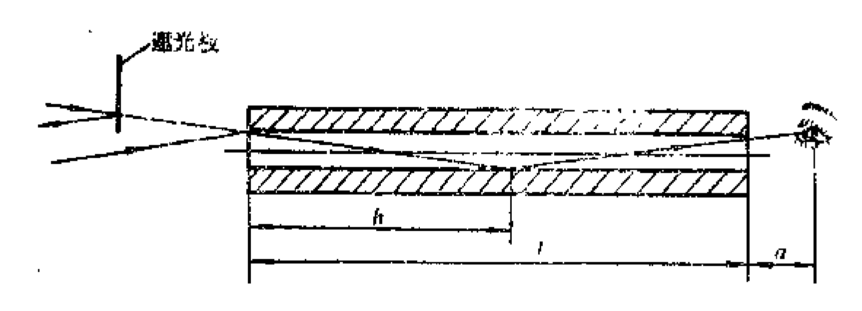


图6-53 阴影三角形的高度h的计算

$$h=\frac{a+l}{2}$$

式中　l——枪膛长度；

a——观察者眼睛离枪管端面的距离。

由于a与l相比较小，所以$h\approx l/2$。因此，为了确定枪管全长的弯曲情况，应该分别从枪尾部分和枪口部分检验枪膛，同时为了判断枪膛的直线性，必须用四个阴影来比较。为此，在得到第一个阴影后，将枪管绕其轴线旋转180°，然后再转90°，再重新转180°。如果这一段枪膛是直的，则在四个位置上的阴影三角形的形状应不变，且均为等腰三角形（图6-52）。如果枪膛是弯曲的，则阴影三角形将不为等腰三角形。图6-54所示为距前端$l/4$处发生简单的、倾斜式的弯曲时，枪膛阴影所呈现的四种变化。图6-54(a)为向上弯曲（即距枪口部四分之一处起翘着向上），图6-54(b)为向下弯曲，图6-54(c)为向左弯曲，图6-54(d)为向右弯曲。如果枪膛的弯曲情况复杂，则呈各种形状的阴影，在这里不作详细介绍。有经验的校直工人，均能根据枪膛所出现的阴影形状，判别出弯曲的位置、方向和程度，故能把枪膛校直。

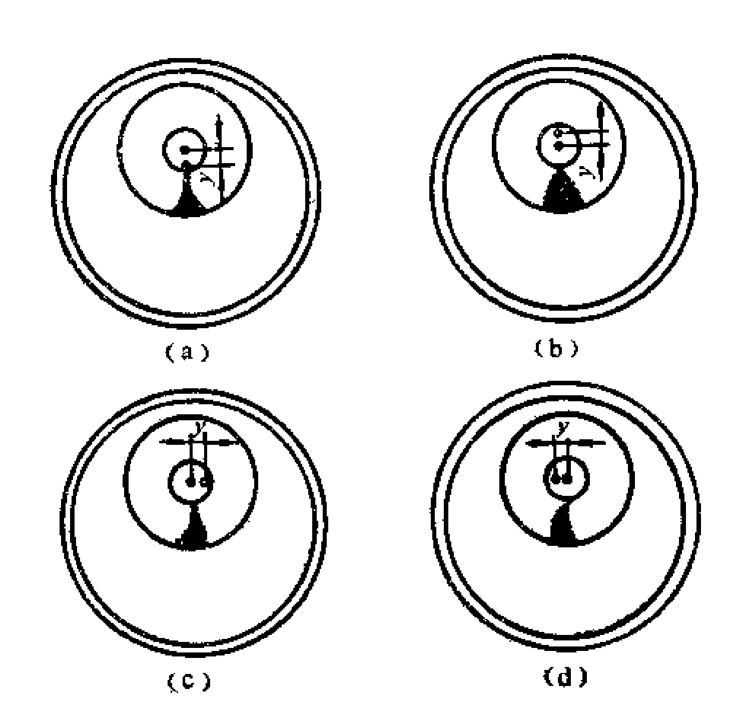


图6-54　距枪口$l/4$处有弯曲时枪膛内所呈现的阴影形状

(a)向上弯；(b)向下弯；(c)向左弯；(d)向右弯

前面已详述了枪管内膛的加工，其外部加工比较简单，现仅介绍其特点。

外圆一般为车削，有的配合部位最终为磨削。加工前应先加工出中心架用的支持轴颈，以减少工件加工时的变形。车削可用单刀、多刀和靠模车削。

枪尾和枪口端面要经多次切削，它们均应与枪膛垂直，尾端面的凹槽要有正确的周向位置，枪口的形状通常用成形刀具加工且与枪膛轴线对称，加工时应以枪膛作为刀具的定位基准。

连接螺纹对细牙用铣削，对方牙用车削或旋风铣，加工方牙螺纹的断隔槽时，应以螺纹起点或通过起点加工出的导向槽作为定位基准。

第十节 枪管的热处理

枪管热处理包括：毛坯正常化（有时在其后要进行高温回火，以降低毛坯硬度）、整体热处理（淬火和回火）、局部热处理、去内应力回火和镀铬后的定性回火。由于枪管硬度不高，对合金钢枪管整体热处理安排在毛坯时进行，对碳素钢枪管由于其淬透性差，整体热处理安排在钻深孔、粗铰深孔及粗车外圆之后进行。碳素钢枪管的整体热处理需要有专门设备，现将其介绍如下：

（1）淬火 一般采用铅炉加热，先在650～670℃的铅槽中预热，然后在830～850℃的铅槽中加热，预热与加热的时间，根据枪管壁厚和每炉所装工件数而定。加热后立即将枪管放在枪管淬火机上用机油进行冷却，时间10～15min。

图6-55所示为枪管淬火机工作简图。已加热了的枪管7放入铁筒1中，其尾部置于夹头2上，而枪口部则置于可伸缩的龙头3下，龙头3和4系同时开闭。当龙头打开时，油罐6内具有0.4～0.5MPa压力的油经龙头3以很大的速度流入枪膛，从内部冷却枪管；经龙头4、软管5的油则流入铁筒1内，从外部冷却枪管。通过枪膛的油，经过夹头2亦流入铁筒内，因而铁筒很快被油充满，并不断溢入槽内，这样，可保证枪管全长内外表面均匀地冷却和全部淬透。当枪管已被完全冷却时，即将龙头关闭。油罐6内的压力是由空气压缩机打入压缩空气而形成的。

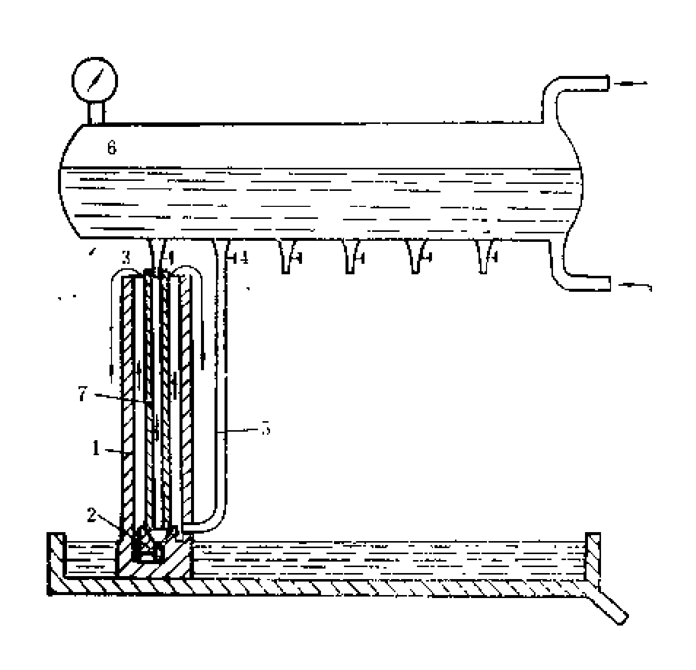


图6-55 枪管淬火机工作简图

经验证明，不宜采用更剧烈的冷却液（水），否则枪管会产生裂纹。

（2）回火 回火与淬火一样在铅浴炉中加热，回火温度则应根据每批枪管中抽出5～10根作试验性回火来决定。试验性回火以前，先要测出枪管硬度，根据枪管硬度来决定回火温度。若硬度大于4000N/mm²时，回火温度取600℃；如硬度为3000～4000N/mm²时，回火温度取550℃；当硬度小于3000N/mm²时，回火温度取480～500℃。

枪管在铅浴炉中加热，由于铅的比重比钢大，枪管放入铅液中会要浮起，因此加热时需

要把枪管装在专用夹具中进行。

为了避免高温下铅液的氧化，防止氧化铅对枪膛表面的有害作用，要定期地用木炭在铅液中去氧，这种木炭装在带眼的盒内，在700℃时将其放到铅液中，放10～15min，即达到完全燃烧为止。同时，应在铅液的表面撒上一层碎木炭，以防止铅的氧化。

热处理后，对枪管要进行100%的硬度检验，并按规定抽取一定百分比的枪管作机械性能试验（拉伸、冲击），同时进行显微组织检查。

第十一节　枪膛表面的镀铬

一、概述

（一）镀铬层的性质与特点

1．铬有很高的化学稳定性，耐腐蚀性能良好。在潮湿大气中很稳定，能长期保持其色泽；在碱、硝酸、硫化物、碳酸盐及大多数气体与有机酸中都有很高的化学稳定性。

2．铬层的硬度高，摩擦系数较低，具有高的耐磨性。铬层的硬度可达HV1000～1100，比最硬的淬硬钢的硬度还要高；钢与钢相摩擦时摩擦系数为0.2，铬与钢相摩擦时摩擦系数为0.16，生铁与生铁相摩擦时摩擦系数为0.09～0.1，而铬与生铁相摩擦时摩擦系数为0.06～0.08；受磨损的零件表面上镀上一层铬其耐磨性可提高3～5倍以上。

3．铬有很好的耐热性。在480℃以下不改变颜色，500℃以上才开始氧化，700℃时硬度才显著降低。

4．铬层表面光亮美观，具有很好的反光性能。

5．铬易溶于盐酸和热的浓硫酸中，在直流电的作用下，如铬层作为阳极则易溶于苛性钠溶液中。

6．铬层硬、脆，容易脱落。当受交变冲击负荷时，表现得更为明显。

（二）电解镀铬的种类

电解镀铬有多种：

1．防护-装饰性镀铬　由于铬层具有多孔性，因此，在钢铁零件表面直接镀铬作为防腐层是不理想的。一般是经多层电镀，才能达到防锈、装饰的目的。在钢铁零件表面上，在镀铬之前，先镀铜、后镀镍、最后镀铬，这一多层电镀的过程称为防护-装饰性镀铬或装饰镀铬。这种镀铬的零件，其防护性能决定于中间镀层的厚度。铜、镍层越厚，气孔越少，其防护性能越高。一般中间镀层厚度：铜不少于12～15μm，镍不少于15～20μm，铬为0.5μm。经防护-装饰镀铬的零件，不仅防腐性能好，而且表面美观（光亮，有象镜面一样的银蓝色光泽）。汽车、飞机、自行车、缝纫机、打字机、钟表、仪器、量具、日用五金等的光亮零件均采用这种镀铬。

2．耐磨性镀铬（也叫镀硬铬）　它是属于在钢铁零件表面上直接镀铬的一种，铬层为光泽铬，用以提高钢件的硬度与耐磨性，常用于量具、切削工具、模具及容易受到磨损的零件上，当镀上一定厚度的铬层后，其寿命可延长3～5倍。这种铬层在镀后要进行加温去氢。

3．乳白镀铬　这种铬层光泽性差，没有网状裂纹，孔隙很少，抗蚀性能良好，但硬度较低，常用于工、量具及医疗器械中。

4．防护-耐磨性镀铬　在钢铁零件的表面上，先镀上一层乳白铬（结晶细密，与基体金

属的结合力好，但硬度较低），然后在此铬层上再镀上一层耐磨性铬层（硬铬），这样，既能提高零件表面的抗蚀性，又能提高零件表面的耐磨性，这种镀铬叫做防护-耐磨性镀铬，或叫变温镀铬，即双层铬。常用于飞机、船舶和枪炮内膛。

5. 松孔镀铬　松孔镀铬是耐磨性镀铬的一种特殊形式。进行松孔镀铬的目的，是为了让松孔保存足够的润滑油，以改善摩擦条件，减少两个摩擦面的金属接触，提高耐磨性。先在零件表面上镀上一层较厚的硬铬层（它的孔隙度较大，且具有网状裂纹），然后用化学或电化学的方法来加深与扩大其上的网状裂纹，成为网状沟纹，用以贮存润滑油。当零件工作时，在高压高温作用下，零件要产生弹性变形，于是沟纹中的润滑油被挤出并溢流到工作面上，从而改善了工作面的润滑性能，提高了工作面的抗磨能力。松孔镀铬主要用于内燃机的气缸、气缸套、活塞环、活塞销以及滑动轴承等的有关零件中。

6. 镀黑铬　在航空、仪器仪表、照相机等光学系统中，为防止光的乱反射，需要消光，与此同时，还要求机件的抗蚀能力有所提高，故需给机件覆盖黑色铬层。获得黑色铬层的方法是在电解液中加入发黑剂（$NaNO_3$、H_3BO_3）。

上面几种镀铬，有几种牵涉到硬铬（光泽铬）和乳白铬的问题。由于电镀时电解液的温度和电流密度直接影响镀层硬度、光泽、气孔率、网状裂纹、结晶组织、结合力等，所以要获得硬铬或乳白铬，除采用较优的电解液配方外，还要严格控制温度和电流密度。温度和电流密度对镀层的影响，如图6-56所示。

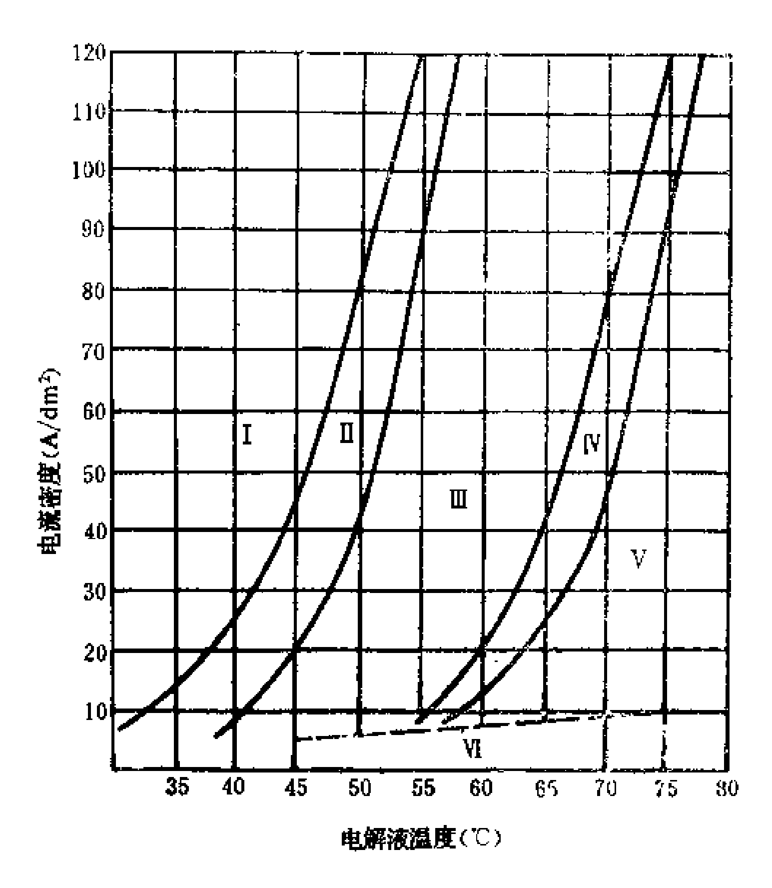


图6-56　温度与电流密度对各种镀层区域的影响

I—灰色铬；II—过渡沉积层；III—光泽铬；IV—过渡沉积层；V—乳白铬；VI—无铬层

由图可见，在低的温度与高的电流密度下，沉积出灰色铬层 I。其特征硬度较高、脆性大（近似于玻璃），有网状裂纹、结晶粗大。这种铬层无使用价值。在高的温度与低的电流

密度下，沉积的铬层为乳白铬层Ⅴ。其特征是硬度低（HV＝250～750），塑性好，无网状裂纹，结晶细致。在中等温度与电流密度下，沉积的铬层为光亮硬质铬层（光泽铬）Ⅱ，其特征是硬度高（HV＝700～900），有密集的网状裂纹，结晶细致。因此，只要严格控制温度与电流密度，就能获得所需要的铬层。

（三）自动武器中零件的镀铬情况

在自动武器中有少数几个零件的表面要进行镀铬，例如枪管、活塞、拨弹导板、调整器、刺刀、表尺板等，现简述如下：

1. 枪管　枪管的镀铬可分为枪膛镀铬和与机匣配合部外圆镀铬。枪膛镀铬又分为线膛镀铬和线膛与弹膛镀铬。线膛与弹膛镀铬可分开进行，也可一次进行。根据枪管的工作条件，枪膛镀铬采用防护-耐磨性镀铬，可先镀乳白铬，后镀光亮铬（硬铬），又叫变温镀铬，双层铬；也可以采用在乳白铬与光亮铬的过渡沉积区镀铬。按照镀铬层厚度的大小不同，镀铬可分为薄镀铬与厚镀铬，在枪膛直径上铬层厚度为0.035～0.1mm，最大不超过0.2mm者为薄镀铬，厚度大于0.2mm者为厚镀铬，厚镀铬后进行定性回火，使枪管寿命有很大的提高。与机匣配合部外圆的镀铬，比较少见，其目的是提高枪管的耐磨性，例如1980年式7.62mm多用途机枪枪管便要进行这种镀铬。

2. 活塞　活塞在工作时，受到火药气体的冲击、冲刷与侵蚀，受到往复运动的摩擦，同时还要求具有精确尺寸，因此它必须具有防护和耐磨性，故在实际生产中采用快速的镀硬铬工艺（此时，电解液中要加入氟硅酸H_2SiF_6）。

3. 刺刀　刺刀镀铬的目的是为了防锈和不耀眼反光（否则容易暴露目标），所以采用孔隙较少、韧性较强的乳白铬。

4. 表尺板　为了使表尺板上的刻度、数字清晰醒目，因此采用装饰性镀铬。

二、镀铬的机理

镀铬过程的机理，在理论上尚未取得一致意见，可参阅有关专著。

三、枪膛表面镀铬的工艺过程

铬有很好的性能，枪膛镀铬后要能充分利用与发挥它的作用，问题的关键还是取决于铬层对基体金属（枪膛表面）的附着力（结合力）。提高附着力的措施有：减小内膛表面粗糙度；彻底去油除锈；镀前预热、先行反镀、阶梯式供电；使铬层结晶致密，沉积均匀；镀后除氢等等。可见，作好镀前准备工作，控制镀铬溶液成分、规范与操作，进行镀后处理是获得优良镀层质量不可缺少的条件，必须切实做好。

（一）镀铬前的准备工序

1. 枪膛表面的精加工　包括浇铅擦膛和用光冲头平整阳线；

2. 按枪膛尺寸分组　用以确定各组枪管的镀铬时间，使其内膛均达到规定的成品尺寸；

3. 去油（碱煮）；

4. 去锈（酸洗）；

5. 用Na_2CO_3中和；

6. 用石灰浆擦拭；

7. 用压力水冲洗。

（二）枪膛镀铬

镀铬时以枪管5本身为阴极，以小钢条（其上镀铅或镀铜和铅）插入枪膛为阳极，并用夹具将其固定在枪膛中，如图6-57所示。夹具由上下两个部分组成，阳极杆1通过下帽7穿过枪膛，并通过上帽3中央露出，上帽上方有压紧与拉紧阳极杆的机构，以保证阳极杆的直线性，同时枪管以其两端外圆在上、下帽中定位，因此能够保证内膛与阳极杆的同轴度。阳极与上、下帽（含阴极——枪管）之间是绝缘的。阳极在枪管上装好后，即可装到挂具上，然后放入镀铬槽中进行镀铬（图6-58）。

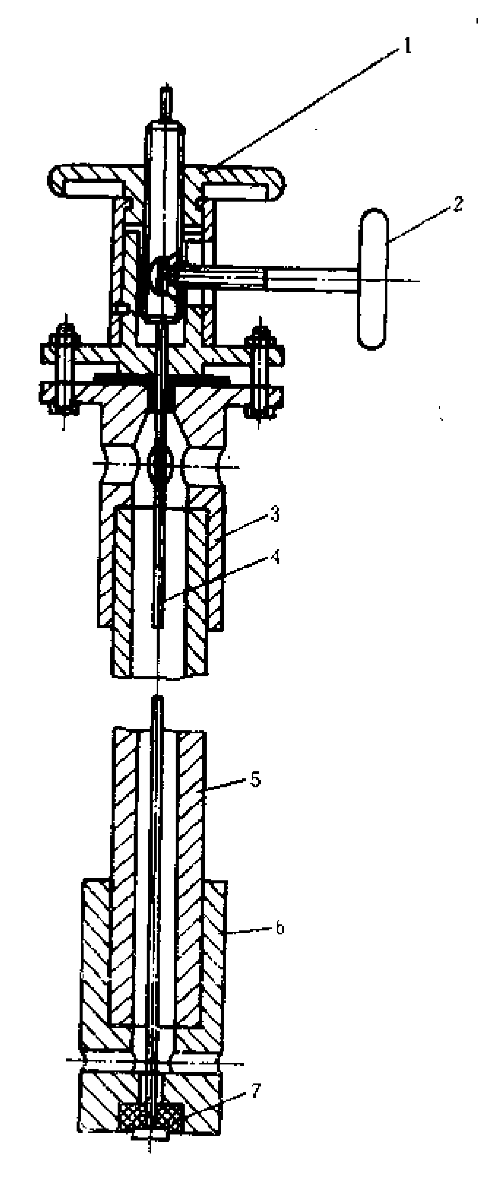


图6-57 安装阳极用的夹具

1—拉紧机构；2—压紧螺钉；3—上帽；4—阳极杆；5—枪管；6—下帽；7—绝缘体

镀铬槽溶液的成分是

CrO_3	150～200g/l
H_2SO_4	1.5～2.3g/l
Cr_2O_3	8～12g/l
Fe	<8g/l
H_2O	1l

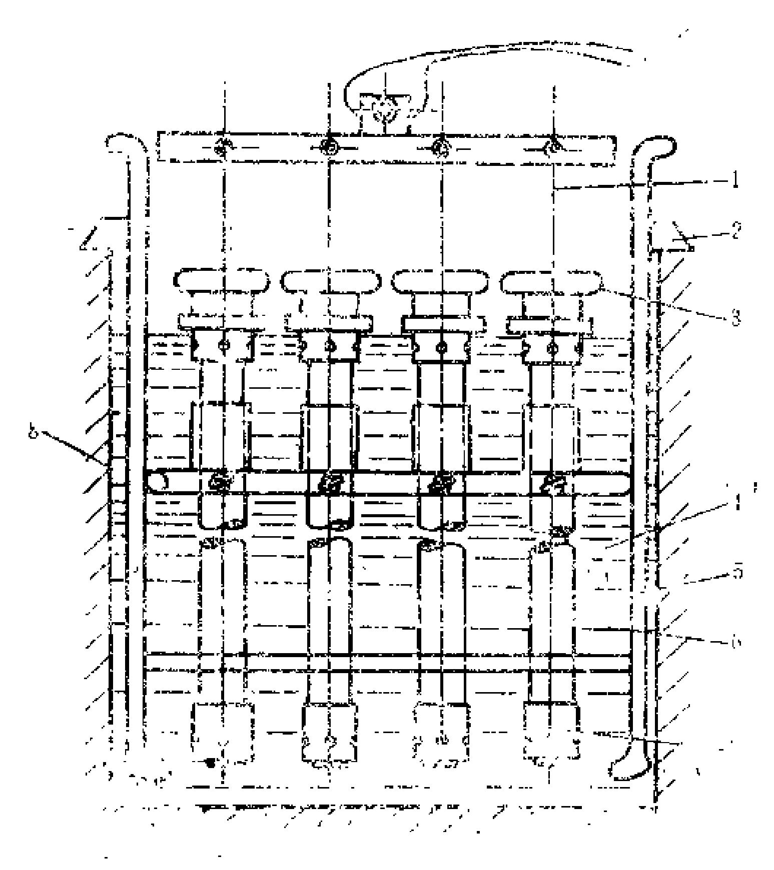


图6-58　枪管装在挂具上并已放入镀槽中

1—阳极杆；2—阳极；3—上帽及拉紧机构；4—镀铬溶液；5—挂具；6—枪管；7—下帽；8—镀槽

镀铬的步骤是：

1．在预热槽中预热，其目的是防止枪管放入镀槽时的冷镀和降低镀槽温度。预热槽的成分为10～15%的铬酸，温度为50～60℃，枪管在槽中保持7～15min。

2、放入镀槽中，通以反向电流，进行阳极腐蚀，以除去枪膛残余的氧化物和脏物，同时使其表面有轻微的溶解，呈现出金属的结晶组织，增强铬层附着力。此时所用电流密度约为30A/dm²，时间1～2min。

3．通以正向电流进行镀铬，其电流密度为30A/dm²左右，槽温为63～67℃，一直镀到规定的时间为止。

镀铬时应保持溶液水平稳定，电流和温度稳定，不能猛升猛降。在镀铬过程中不能中途停电。

（三）镀铬后的结束工序

将枪管从镀槽中取出，经清洗、下阳极、Na_2CO_3中和、烫干，然后进行尺寸、外观检查。

四、镀铬后的检验

（一）外观检查

用肉眼在人工照明下观察线膛，要求：

1．镀铬层为银白色稍带蓝色的均匀镀层，不得有烧焦、铬瘤、铬环、发白发灰、颗粒、波浪纹、麻点、划痕等。

2．线膛铬层应完整，不得有线状或块状脱落，应有较小的表面粗糙度。

3．有的枪管枪口60°处的铬层应不少于整个斜面的1/2。

（二）尺寸检验

用样柱检查线膛尺寸，对孔小的和孔大的，分别进行处理。

对于孔径小或表面粗糙度不合要求者，可进行浇铅擦膛。

对于铬层有严重缺陷或局部未镀上铬者，应退铬重镀。

对于孔大且表面粗糙度尚好者，可以进行补镀。

退铬重镀和补镀与正常镀铬稍有不同，应按有关守则进行。

第十二节　枪管的氧化与磷化

氧化和磷化是两种表面处理方法，其目的是使钢铁零件表面产生保护膜，以提高零件的耐腐蚀性能。由于氧化和磷化有各自的特点，所以各种武器上这两种方法几乎均用。对单人使用的武器，其外露零件多用氧化，虽防腐性能较差，但色泽比较美观；而对集体武器以及单人使用武器的内部零件则多用磷化，其防腐性能较好，能改善耐磨性，且便于磷化后涂漆，但色泽较差。现分述如下：

一、氧化处理

（一）概述

将钢铁制成的零件（如枪管、机匣等），放入含苛性钠、硝酸钠或亚硝酸钠溶液中处理，使零件表面生成一层很薄的黑色氧化膜的过程，称为氧化处理，简称发蓝。

氧化处理的实质就是用化学或电化学的方法对金属零件的表面进行腐蚀，使其生成一层黑色或蓝黑色的氧化膜，可防止表层金属被腐蚀。氧化膜的色泽美观，但厚度较薄，一般为0.5～3μm，故防腐蚀性能较差。

众所周知，当钢铁零件置于空气中，由于自然腐蚀，也会在零件表面生成氧化膜（生锈），可是这种自然腐蚀所生成的氧化膜却不能进一步防止金属主体被腐蚀，反而会使零件腐蚀加剧，因面使零件毁坏。

自然腐蚀形成的氧化膜之所以不能防止金属主体进一步地被腐蚀，是因为它不是在金属表面上同时地均匀生成的（零件表面污染情况不同，氧、水气、温度等因素对零件各部分作用不同，致使氧化不均匀），因而它是疏松的、多孔的、不可靠的氧化膜。它起不到保护膜的作用，故氧化过程会继续深入到金属主体中去。

金属零件的氧化处理，是在一定条件下，使金属零件表面全面地、同时地、均匀地形成一层与金属主体紧密结合面无孔的氧化膜，使金属主体与外界隔绝，从而保证了金属零件不会再进一步地被腐蚀。

氧化处理的方法很多，有碱性氧化法、酸性氧化法和电解氧化法，目前普遍采用碱性氧化法，下面仅介绍碱性氧化法。

（二）碱性氧化处理——氧化膜生成的机理

经研究，氧化膜是由磁性氧化铁（Fe_3O_4）的微小晶粒由点连成面而生成的。将钢铁零件放入具有一定浓度、一定温度的碱性溶液中，在开始时金属铁在碱性溶液里溶解，在金属铁和溶液的接触界面处形成了氧化铁的过饱和溶液，更进一步在金属表面上的个别点生成了氧化铁的晶胞。这些晶胞逐渐增长，直至互相接触，形成一层连续成片的氧化膜。当氧化膜将金属完全盖着之后，使溶液与金属的作用隔绝，铁的溶解速度与氧化膜生成的速度随之降低。

氧化膜的厚度与晶胞形成速度和结晶生长速度有关。当晶胞形成速度很快，则在金属表面上的晶胞数便多，晶胞向空间增长使各结晶相互结合而形成一层连续的氧化膜的厚度便比较小，如图6-59(a)所示；若晶胞形成的速度慢，即单位面积上所包含的晶胞少，各晶胞之间的距离大，晶粒增长的可能性愈大，由各晶粒相互结合而形成的一层连续的氧化膜也就较厚，如图6-59（b）所示。为了得到较厚的氧化膜，以提高防护性能，在实际生产中常在不同浓度和不同温度的碱性溶液中进行分段氧化处理。先将工件在浓度较淡和温度较低的碱性溶液中进行氧化处理，使生成少量的晶胞，然后随即将工件移入溶液较浓、温度较高的碱性溶液中促使晶胞迅速生长，连成薄膜。这样处理所得到的氧化膜的厚度最大可达2～3μm。

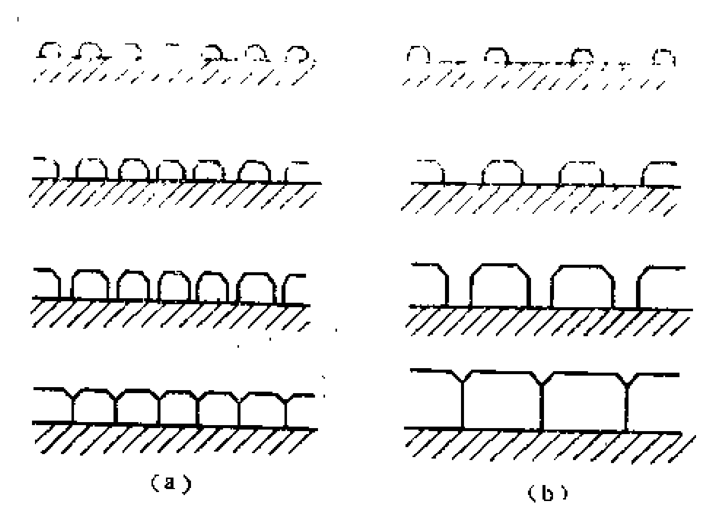


图6-59 钢铁零件上氧化膜的生成成长示意图
(a)晶胞多形成的氧化膜较薄；(b)晶胞少形成的氧化膜较厚

碱性氧化处理的溶液是苛性钠（NaOH）、亚硝酸钠（$NaNO_2$）和硝酸钠（$NaNO_3$）的水溶液，将钢铁零件放入此溶液中，便会发生反应，生成亚铁酸钠（Na_2FeO_2）和铁酸钠（$Na_2Fe_2O_4$），再由亚铁酸钠与铁酸钠相互作用生成磁性氧化铁（Fe_3O_4）即氧化膜。

其生成氧化膜的反应如下

$$3Fe+NaNO_2+5NaOH \longrightarrow 3Na_2FeO_2+H_2O+NH_3\uparrow$$

$$8Fe+3NaNO_3+5NaOH+2H_2O \longrightarrow 4Na_2Fe_2O_4+3NH_3\uparrow$$

$$Na_2FeO_2+Na_2Fe_2O_4+2H_2O \longrightarrow Fe_3O_4+4NaOH$$

由于在钢铁制件的表面附近的溶液里，亚铁酸钠和铁酸钠的浓度最大，所以在那里的溶液中所生成的磁性氧化铁的过饱和度最大，因而便可形成磁性氧化铁的结晶，先形成核（晶胞），随之长大成晶粒，各晶粒长大至相互接触，连成一片，便形成了一层完整的氧化膜。

（三）碱性氧化处理的工艺过程

1．氧化处理前的准备工作

主要包括：抛光、去油和去锈。

2．碱性氧化处理

先将枪管放入含NaOH、$NaNO_2$、$NaNO_3$的预备槽中处理30min，由于NaOH的含量略低（500～600g/l），槽温也较低（136～140℃），故使枪管表面产生稀少的磁性氧化铁晶

胞。

然后将枪管放入基本槽处理30min，由于NaOH的含量较高（600～700g/l），槽温也较高（140～146℃），故能使晶胞迅速成长，形成较厚的氧化膜。

3. 氧化处理后的结束工作

主要包括：冷水冲洗、沸水煮洗、放入肥皂溶液中处理（形成一层硬脂酸铁膜，增加枪管氧化膜的钝性）、烘干和蘸油。

4. 氧化膜的质量检验

（1）蘸油前的外观检查　用肉眼检查氧化膜的外观。碳素钢和低合金钢的零件其外观应是均匀的黑色和黑蓝色，铸钢为暗褐色，高合金钢呈褐色和紫红色。对于局部淬火的零件表面，有焊缝处，粗加工处，凹坑以及外形复杂的地方允许色泽稍有差别。零件表面不允许有没有氧化上的斑点，不应有红色沉淀物、绿色沉淀物、花斑点以及机械损伤等。

（2）膜的连续性检验　用汽油除去被检表面上的油，然后在此表面上滴3～4滴3%的硫酸铜溶液，保持30s，再用水洗去，该处不应有镀铜现象，即算膜的连续性检验合格。

（3）机械强度检验　用48#石英砂100g，借漏斗与玻璃管（长500mm，直径8mm）让砂垂直落于距玻璃管下端100mm并已倾斜45°的零件氧化膜层上，然后在该表面上用棉花擦去灰尘，并用0.5%硫酸铜溶液浸湿30s，此时零件表面不应有铜析出。

（4）化学稳定性检验　先将零件表面的氧化膜很好地去油，随后将其浸入0.175%的稀硫酸中，时间30s，将零件取出用水清洗，此时氧化膜不应有溶解，并且零件的外观应保持不变。

二、磷化处理

（一）概述

把钢铁零件放入磷酸盐溶液中进行浸泡，使金属表面获得一层不溶于水的磷酸盐薄膜的过程，叫做磷化处理，简称磷化。

目前普遍采用磷酸锰铁盐和磷酸锌盐溶液进行磷化，磷化膜是由磷酸铁、锌、锰盐所组成，其颜色呈灰色和暗灰色。

磷化膜与氧化膜相比较，其优点是：

1. 磷化膜的厚度为7～50μm远远超过氧化膜的厚度。磷化膜的抗蚀能力比氧化膜的抗蚀能力大许多倍，特别是经过油蜡浸渍和涂上油漆之后，抗蚀能力提高得更多。

2. 磷化膜与金属联结的强度大，且具有多孔性，能促使清漆、肥皂液和锭子油的浸润，与油漆有较高的结合力，故可作为油漆底层。

3. 磷化膜具有减磨性，能耐磨耐热，故能改善钢铁表面的磨损。

4. 磷化膜可以改进冷加工（冷拉、冷轧、冷冲）的质量，使成形容易并节省动力。

5. 磷化膜具有电气绝缘性能。

磷化膜的缺点是：

1. 色泽没有氧化膜那样光亮美观。

2. 膜的硬度低，机械强度弱，且有脆性。

由于磷化膜能基本满足枪件的防腐性和耐磨性的要求，而且处理时设备简单，操作方便，成本低，生产效率高，故在枪械制造中日益广泛使用。

磷化处理可分为普通磷化、快速磷化、常温磷化和电解磷化。规定要磷化处理的枪管，

有的采用普通磷化，有的采用快速磷化。

普通磷化法是基本的方法，处理时常用温度为97～99℃。它适用于以防锈为目的的一种处理方法。

快速磷化法是在磷酸盐溶液中加入氧化剂和铜盐，从而加速了磷化的过程。这种磷化多用于油漆打底，处理时溶液的温度为50～70℃，属于中等温度。也可以在溶液中加入氧化钙或氢氧化钙来促进磷化过程，这时溶液温度高于85℃，所得的磷酸盐膜与普通磷化法所得磷酸盐膜一样，可作为大气防锈之用，这时处理时间与磷酸盐的消耗均减少3～4倍，故非常经济。

（二）磷化膜生成的机理

磷化膜是磷酸二氢盐与金属铁相互作用生成的。磷酸二氢盐通过水解、电离，当钢铁零件放入其溶液中便产生电化学反应，在钢铁表面上沉积出来难溶于水的磷酸一氢盐和正磷酸盐，它们过饱和后，便形成磷化膜的结晶核，结晶逐渐长大，直至形成一层磷化膜，使金属表面与溶液隔开，磷化过程便告结束。

（三）磷化处理的工艺过程

1．处理前的准备工作　与氧化处理相同。

2．磷化处理　溶液成分、槽温、处理时间，详见有关手册。

3．磷化后的结束工作　包括冷、热水清洗，在$K_2Cr_2O_7$溶液中钝化处理，热水清洗，肥皂液处理，干燥和涂油。

枪管磷化后，对磷化膜要进行外观检查，对它的抗腐蚀性和机械强度要进行抽验。将磷化表面浸入3％的NaCl溶液中6h（温度为20℃），表面不产生黄色或红色斑点为合格。机械强度的要求与氧化处理基本相同。

第十三节　枪管的检验与试验

一、枪管的检验

枪管在制造过程中和完成之后均要进行检验。检验的内容有四个方面：

1．尺寸精度的检验　包括线膛尺寸、弹膛尺寸、外部尺寸特别是重要配合尺寸等的检验。

2．形状精度的检验　包括内膛直线度、圆度和圆柱度等的检验。

3．位置精度的检验　包括同轴度、垂直度和对称度等的检验。

4．表面质量的检验　包括表面粗糙度、镀层质量、氧化膜或磷化膜的质量、表面裂纹以及其它缺陷疵病的检验。检验主要用肉眼观察，但有的也还要进行一些试验。对于有无裂纹的检验，除用目检以外，通常要进行磁力探伤。

除上述检验以外，枪管在投料前，对原材料要进行化学成分、机械性能和金相组织的检验；在加工过程中，热处理工序之后要进行机械性能和金相组织的抽验和100％的硬度检查。

二、枪管的高压弹射击试验

为了检验枪管的强度，即枪管用材质量和制造质量，在制造过程的末尾，对每根枪管均要用一发或两发高压弹进行射击试验。所谓高压弹，其膛压比普通弹约高17～46％，通常膛压p_{max}＝（400～420）±10MPa。例如56式7.62mm普通弹膛压为280MPa，而高压弹膛压

为[illegible]MPa。试验是在带有安全保护的专用装置内进行的。试验后，如果枪管线膛、弹膛尺寸没有变化（即无塑性变形），用目力和磁力探伤检查，没有裂纹、脱铬及其它疵病者，即认为合格。

三、枪管的磁力探伤

（一）概述

为了检验枪管材料的缺陷以及枪管在制造过程中（如热处理、校直等）和试验中可能产生的裂纹，每根枪管在工艺过程的最后，均要进行磁力探伤检验。

磁力探伤是无损检验的一种。无损检验通常包括射线探伤（X射线、γ射线）、表面探伤和超声波探伤。磁力探伤是表面探伤中的一种。磁力探伤能可靠地检[illegible]

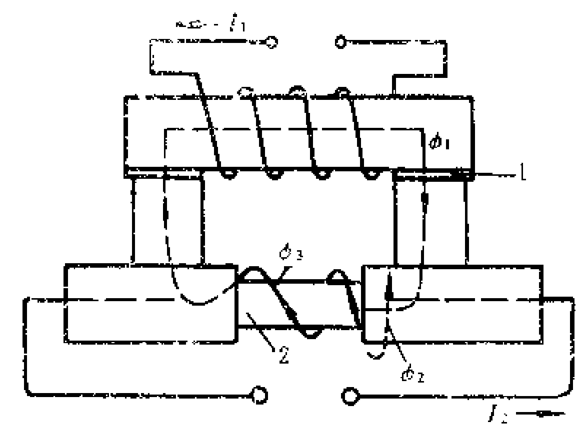


图6-61 复合磁化法
1—绝缘体；2—工件

磁化零件所用的电流可以是直流，也可以是交流。因此，按磁化电流的不同，磁化又可分为直流电磁化法和交流电磁化法。

直流电磁化法所产生的磁场强度大（电磁损耗少，磁场均衡），但电源较复杂。它最大可以发现距零件表面6～7mm深处的缺陷，一般可发现距表面3～4mm深、宽度为0.01～0.2mm的缺陷。为了检验深藏在表面内部的缺陷，最好采用直流电磁化法。

交流电磁化法设备简单，但交流电有集肤作用，产生的磁场强度都集中在工件表面，工件内部的磁场强度很小，因此不易检查出零件表面下深处的缺陷，一般说来只能发现离零件表面1～1.5mm深的缺陷。由于交流电磁化法发现表面缺陷特别灵敏，因而交流电磁力探伤应用极广。

为了得到较好的探伤效果，在应用复合磁化法探伤时，应将磁化电流定为：一为交流电，另一为直流电。磁化电流通常采用低电压高电流。

在进行磁力探伤时，可以把磁化与磁粉检验分开进行，也可以连续进行。前者叫剩磁法，后者称连续法。用剩磁法进行探伤时，先将零件磁化，然后撤去磁化电流，使外加磁场消失，再在零件表面施撒磁粉进行检验。这种方法适用于顽磁性和矫顽磁力较大的材料所制成的零件。用连续法进行探伤时，零件是处于外加磁场的作用下进行检验的，即零件在接通磁化电流的同时，在其表面施撒磁粉，并进行观察检查。

磁力探伤显示用的磁粉可以是干的，也可以是湿的。干磁粉便于携带，但施撒时容易起尘，施撒后不易收集，所以用得较少。湿磁粉（磁粉悬浮液）用得较多，它的制作方法是：在50～60％煤油和50～40％变压器油的混合油中，按每升加入粒度为0.2～1μm的磁性氧化铁（Fe_3O_4）粉15～30g，经搅拌即得磁粉悬浮液。

（四）退磁

零件在经过电磁探伤后存在有剩磁，它能使零件在工作、运转时吸附铁屑，增加磨损，这是不允许的，因此零件在电磁探伤后要进行退磁。工件在加工过程中若进行磁力探伤，也需要退磁，否则将给切削、定位、测量等带来不利。若工件在磁力探伤后要进行热处理（加热到居里点以上时），则剩磁便会消失，故不需要进行退磁。

退磁的方法有两种：交流退磁法和直流退磁法。

1．交流退磁法　其具体方法又有：

其一，将磁化后的零件通以低频交流电，使电流逐渐减弱到零。此法适用于大型零件的退磁。

其二，将磁化后的零件，放在一个强度逐渐减弱的50Hz交变磁场中进行退磁。磁场减弱的方法有两种：一种是逐渐降低退磁线圈中的交流电强度，这种方法退磁效果较好，但较费事；另一种是将零件慢慢地从退磁线圈中抽出来，此法应用极广。

图6-62所示为零件退磁时的连续磁滞回线。



图6-62　零件退磁时的连续磁滞回线

2．直流退磁法　用直流磁化的零件，必须用直流电退磁，其方法是在改变电流极性的情况下，将电流逐渐下降到零，以使零件中的磁场减弱到最低限度。退磁时所用电流的起始强度应等于或大于原来检查时采用的磁化电流强度，这样才能得到最大的退磁效率。

为了检验退磁的程度，可用几个回形针串连起来，移至退磁后的零件，如果回形针不摆动或不吸附在零件上，即证明剩磁已全部退掉。

第七章　机匣制造

第一节　机匣的结构与技术要求

机匣是自动武器的基础零件。它的主要作用是把其他所有零、部件结合在一起，构成一个整体，在工作中导引活动机件运动，并与有关机构相互配合完成开锁、闭锁、供弹、抛壳等动作。所以，机匣的质量好坏将直接影响自动武器工作的可靠性。但机匣的工作条件不良，工作时受力情况复杂，与活动机件（枪机、枪机框等）相配合部位，经常在干摩擦条件下工作，并承受较大的交变冲击载荷，从而要求机匣要有足够的强度、耐磨性和冲击韧性；工作中变形要小，以保证工作可靠；同时，机匣结构比较复杂，位置尺寸多，机械加工的工艺流程长，工作量大，加工困难。除与枪管配合孔、导轨面的加工精度要求较高外，其他表面为中等加工精度，但相互位置精度，特别是对称度要求较高，其目的是保证自动武器的精度和各机构之间动作的协调。

本章主要分析机匣的机械加工问题。

一、机匣的结构

机匣的结构类型很多。按机匣的断面轮廓形状，分为矩形机匣和圆筒形机匣；按机匣的构造特点，分为整体式机匣和装配式机匣（如冲铆机匣、冲焊机匣等）两大类。

机匣的断面轮廓形状，主要取决于枪机的外部形状和与机匣连接的零、部件配置情况；机匣的构造特点，则与机匣的受力情况有关。当闭锁支承面和开锁斜面的位置距枪管尾端较远时，大都采用整体式机匣，对那些闭锁支承面或开锁斜面在机匣上的位置距枪管尾端较近的自动武器，或无闭锁支承面和开锁斜面时，多采用装配式机匣。

整体式机匣的毛坯有两种，一种是锻件或型材，经机械加工后成型（如捷ZB-26轻机枪，美汤姆逊冲锋枪）；另一种是精密铸造件，配合部位经机械加工后成型（如美M16自动步枪）。整体式机匣的优点是：能采用强度较高、机械性能较好的中碳钢和合金钢材料，所以强度和刚性好；经机械加工，可以保证要求的尺寸精度、形状精度、位置精度和表面粗糙度。其缺点是机械加工量大，材料利用率很低（一般为15～25％）。考虑机匣的主要作用是闭锁支承，导引枪机和枪机框运动，故整体式机匣采用较多。如56式7.62mm轻机枪为整体式矩形机匣（图7-1），56式14.5mm高射机枪为整体式圆筒形机匣（图7-2），

装配式机匣是采用机械加工（闭锁支承部分）与冲压（导引部分）加工方法先制出有关部分，然后利用铆接或焊接方法再装成一体，装配后视情况对有关表面进行精加工，最终达到图纸的技术要求。其中有冲铆、冲焊两种结构。冲铆机匣连接可靠，质量稳定，但铆接工序比较麻烦；冲焊机匣要特别注意焊接质量，防止变形。焊后须进行相应的热处理，用以消除焊接过程中产生的残余应力。如56式7.62mm冲锋枪、西德G3自动步枪的机匣均为装配式机匣。

装配式机匣的优点是：显著地减少了机械加工工作量，大大提高了材料利用率，降低了

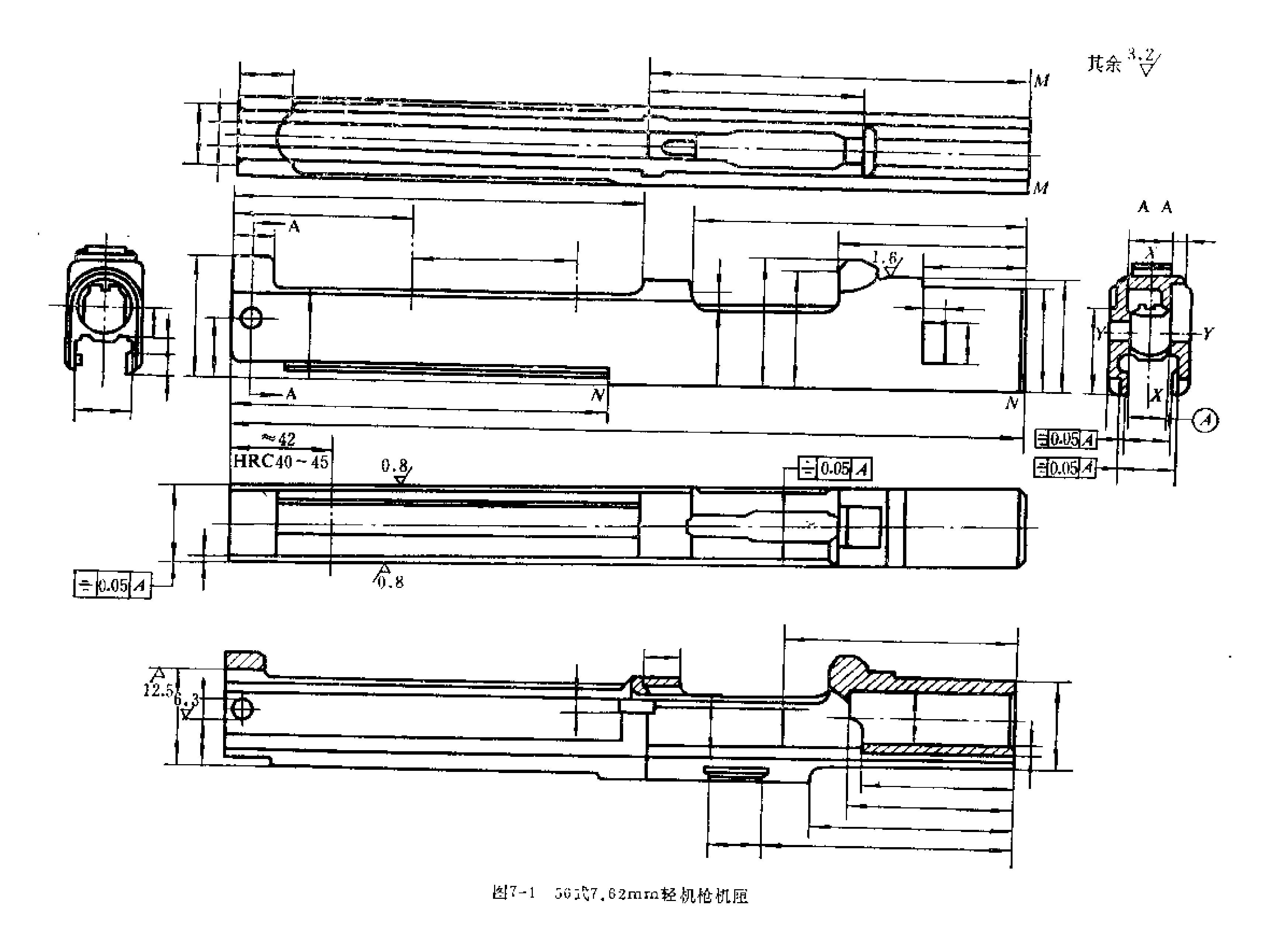


图7-1 56式7.62mm轻机枪机匣

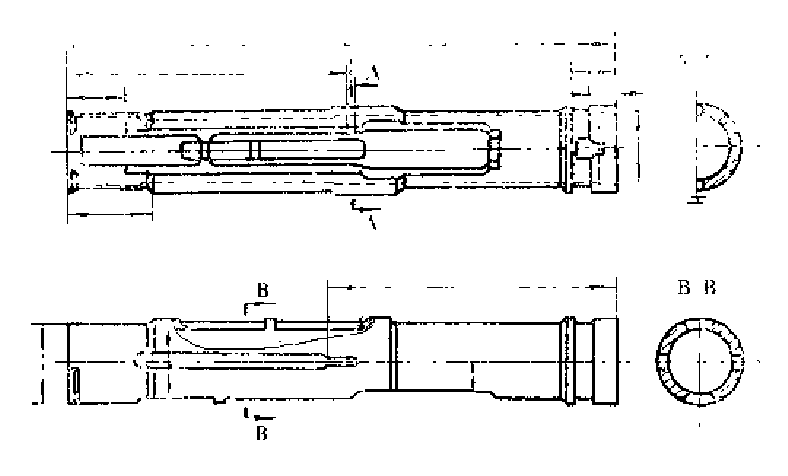


图7-2　56式14.5mm高射机枪机匣

生产成本和机匣重量；但冷冲压件只能采用含碳量较低的材料，因而强度、刚度方面不如整体式机匣，另外加工和使用中容易变形，尺寸精度、形状和位置精度难以保证，在加工以致设计中须认真对待。

机匣的具体结构应视与其配合的零件、部件结构及保证射击过程中动作的协调性而定。机匣上一般制有与枪管配合的孔，与枪机、枪机框配合的导轨或槽，与供弹机构配合的孔或槽，与枪尾、击发机构配合的孔或槽，以及为抛壳、进弹需要而制出的孔或槽。究竟采用哪种方式的机匣，机匣上具体结构怎样，设计时须根据自动武器的类型、自动方式、枪机和枪机框与机匣的配合方式以及机匣内部各构件的配置情况而定。

二、机匣的技术要求

机匣的技术要求主要包括对机匣主要配合部位和连接部位的加工精度和表面粗糙度。

（一）机匣主要配合表面和连接部位的加工精度要求：

1　机匣与枪机、枪机框的配合表面的尺寸精度一般为IT9～11级，其中，与枪机的配合面应高些。

2．机匣与枪管的配合表面：

当二者采用圆柱体过盈配合时，机匣上的与枪管配合孔尺寸精度一般为IT9～11级。

当二者采用普通螺纹连接时，机匣上与枪管配合的螺纹孔一般选公制2号细牙螺纹，螺纹的精度等级可选5H或5G。

采用方牙断隔螺纹连接时，机匣上的方牙螺纹孔内径精度为IT11级，外径精度可选IT12～13级。

3．枪机框配合槽底部与枪管配合孔间的距离公差为±0.05mm。

4．复进簧顶杆孔与枪管配合孔间的距离公差为±0.05mm。

5．机匣槽及各内槽之间与枪管配合孔中心的对称度允差为0.1～0.05mm。

（二）机匣主要配合表面与连接部位的表面粗糙度要求

机匣内部各配合孔或槽的表面粗糙度一般取$Ra\leqslant3.2$。其中与枪机、枪机框的配合表面可在$Ra1.6$～$Ra0.8$之间选取，与枪管的过盈配合孔为$Ra1.6$～$Ra0.8$，机匣上的闭锁支承面为$Ra3.2$～$Ra0.8$。

第二节　机匣的材料和毛坯

根据机匣工作中的受力情况要求，机匣材料现多采用高级优质碳素结构钢和高级合金结构钢，其中以50BA、50AZ为广泛，个别自动武器的机匣也有选50A、40Cr等材料，热处理后硬度要求达到HRC40～45。

机匣毛坯的类型，主要根据机匣本身结构及对其强度要求来选择。一般可选择型材、锻件（自由锻或模锻件）、精铸件或冷冲压件，目前国外有些自动武器的机匣采用有色金属或硬塑料。

机匣毛坯的选择原则一般是：对断面形状规则且尺寸相差不大的整体式机匣，可采用型材（包括异型钢材）；对断面形状较为复杂而轮廓尺寸差别较大的整体式机匣，可采用锻件毛坯，其中尺寸较小、产量较大的机匣多采用模锻件，反之可考虑采用自由锻件；对断面形状复杂的机匣，若工作中受力较小时，可考虑采用精铸件毛坯，材料多用有色金属或硬塑料。冷冲压件毛坯主要用于装配式机匣，特别是冲铆结构的机匣，冲压后需经过必要的机械加工方可铆接有关零件。

锻件毛坯在机械加工前须进行正火处理，冲焊装配式机匣焊后须进行回火处理，其目的是消除内应力并改善材料的机械加工性能，热处理后再进行机械加工。

第三节　机匣的机械加工工艺过程

自动武器的机匣种类不同，它们的机械加工工艺过程也随之不同，并且存在很大的差别。现在自动武器中广泛采用的是矩形机匣和圆筒形机匣，二者的机械加工工艺过程就差别很大。但从机匣的结构上看，它们的共同特点是配合表面多，结构复杂，精加工表面多，机械加工工艺流程长，工序数目多，通常长达60～150道工序。冲铆机匣的冲压机匣体机械加工工序虽少些，但其主要组合件接套却很复杂，机械加工过程也很繁，二者工序总数往往超过矩形整体式机匣的工序数，因此机匣的机械加工工艺过程需要认真考虑。

下面就矩形机匣和圆筒形机匣的机械加工工艺过程做一分析。

一、矩形机匣的机械加工工艺过程

（一）工艺基准的选择

矩形机匣的机械加工工艺基准选择仍需贯彻基准重合的原则，即选择机匣的设计基准作为机械加工中的工艺基准，对个别不适宜作工艺基准的设计基准可适当选辅助基准来代替。但总的原则是：既方便加工，又能满足产品图提出的各项技术要求。

现结合56式7.62mm轻机枪机匣加以说明。

分析图7-1的机匣简图可知：该机匣的横向尺寸是以中心对称轴面（即与枪管配合表面的垂直中心轴面$X-X$)标注的，纵向尺寸是由前端面$M-M$或经后端面标注的，高度尺寸则大多由底面$N-N$标注的，但从保证机匣与各活动构件的相互位置和工作性能考虑，高度方向的设计基准是与枪管配合表面的水平轴线$Y-Y$，所以56式7.62mm轻机枪机匣的设计基准是：

宽度方向：与枪管配合表面的轴线$X-X$，

长度方向：机匣前端面$M-M$（或后端面），

高度方向：机匣底面$N-N$（或轴线$Y-Y$）。

上述各设计基准也正是一般矩形机匣的设计基准。

在编制矩形机匣的机械加工工艺规程时应尽量选上述设计基准为工艺基准，以减小基准不重合误差。可是从机匣的结构及工作性能考虑，机匣的机械加工过程中必须保证各主要工作表面之间的对称性要求，其中主要是保证机匣各内槽表面对机匣与枪管配合表面的对称度要求，这也是矩形机匣机械加工过程中的特点。为此，机械加工中考虑两种加工方案：一种加工方案是"先孔后槽"，即先加工出与枪管配合的孔，然后以孔定位加工各内槽表面；另一种加工方案是"先槽后孔"，即先加工出内槽表面，然后再以内槽表面定位加工出机匣与枪管配合孔。但一般机匣上与枪管配合孔的结合长度比内槽纵向长度短，以二者的配合孔定位不稳，加工中难以保证加工质量，故第一种加工方案应用不多，实际加工中往往采用第二种加工方案。

另外从图7-1中还可看出，机匣的内槽多数是朝同一方向开口的，这样就限制了加工对称表面时利用内部为定位基准的可能性，即不便于用一个内槽定位加工另一个内槽。为了保证各内槽之间的对称度要求，通常采用的措施是增设辅助基准，这个辅助基准一般选用机匣的两外侧面。所以矩形机匣的机械加工工艺基准通常选择为：

宽度方向：左侧面或右侧面（习惯上多采用右侧面）；

长度方向：前端面或后端面；

高度方向：底面（顶面或导轨面）。

必须指出，从结构和使用方面考虑，两侧面宽度尺寸的精度等级要求不高，一般选择不高于IT12级的低精度，如图7-3（a）所示。但由于选用了侧面作为工艺定位基准，为保证各内槽间的对称度要求，必须将外侧面宽度尺寸的尺寸精度提高。由尺寸链的工艺尺寸换算可知，宽度尺寸的尺寸公差为内槽对称度允差的两倍，即0.1mm，如图7-3（b）所示。

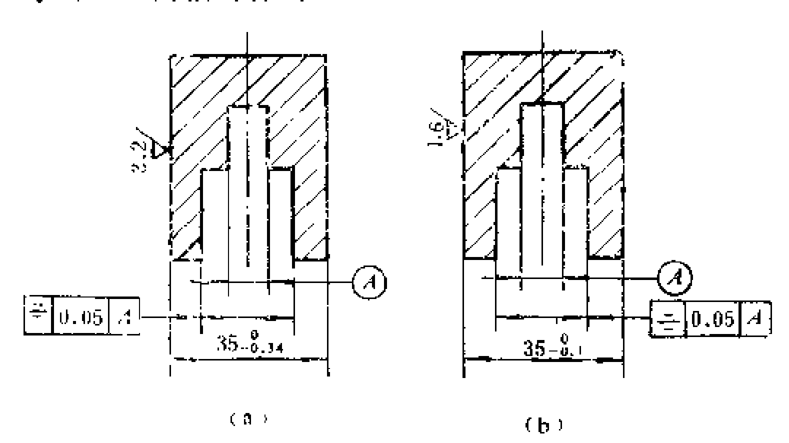


图7-3　机匣两侧面宽度尺寸公差换算

（a）原宽度尺寸公差；（b）加严后宽度尺寸公差

（二）机匣的机械加工阶段的划分

通过对图7-1的图纸分析和工艺基准的选择，一般矩形整体式机匣的机械加工大致可分为三个加工阶段，即外部加工阶段、内腔加工阶段和光整加工阶段。

1．外部加工阶段

外部加工阶段是机匣机械加工的第一阶段。本阶段的主要任务是加工出三个方向的定位精基准，同时去除机匣毛坯的大部分余量，使机匣的外部尺寸初步接近零件图的外形尺寸。加工方法主要是通过铣削方式先后交替地对机匣各个外表面进行粗加工和精加工，以得到相

互垂直的六面体，并保证机匣两外侧面达到提高后的尺寸精度要求。

本阶段的工序安排一般顺序是：

（1）高速铣两外侧面；

（2）磨两外侧面（以达到提高后的宽度尺寸公差要求）；

（3）高速铣机匣顶面；

（4）高速铣机匣前端面；

（5）高速铣机匣底面；

（6）高速铣机匣后端面。

2．内腔加工阶段

内腔加工阶段是机匣加工的第二阶段。本阶段的主要任务是加工机匣的内腔（即内槽），机匣与枪管的配合表面及其他配合部位，使它们在尺寸和形状方面接近或达到产品图要求，完成热处理前的机械加工工序。

工序安排的一般顺序如下：

（1）加工内槽（以外侧面为定位基准）；

（2）加工与枪管配合表面（以内槽定位）；

（3）加工机匣上其他配合表面（以外侧面、内槽或与枪管配合孔定位）。

必须指出，上述两个加工阶段的工序安排不是连续的，中间视需要可插入其他工序和辅助工序，如切螺纹的退刀槽、钻孔的导引孔及靠模铣的下刀孔等，目的是使加工方便，保证加工质量。

3．光整加工阶段

光整加工阶段是机匣机械加工的第三阶段。本阶段在机匣热处理之后进行。其主要任务是除去热处理变形及为精加工所留下的余量，最终达到图纸上的各项要求。采用的加工方法有精铰孔、修整螺纹、精铣主要配合表面、刮研闭锁支承面等精加工和光整加工工序。

机匣加工过程的热处理工序安排在内腔加工阶段结束，光整加工阶段之前进行。这是因为机匣结构复杂，壁又薄，加热时容易变形。热处理之后进行光整加工可消除热处理变形的影响，同时有利于提高刀具的寿命。另外，热处理前要安排修整和检验工序，热处理后要安排清洗和校正工序。

在机匣加工的最后，要安排磁力探伤和表面处理工序，以发现机匣加工或原材料的内部缺陷，並防止外部介质的腐蚀。

（三）举例

1．56式7.62mm半自动步枪机匣加工分析

56式7.62mm半自动步枪机匣简图如图7-4所示。机匣属矩形整体式结构，材料采用50BA，毛坯选用模锻件。

图7-5为该机匣的结构简图。为图面清晰起见，图中的尺寸数字没有注出，下面仅对其机械加工过程做一分析。

（1）机匣的技术要求

为了保证机匣与其配合件装配顺利和工作可靠，机匣上各工作表面，除应在机械加工中必须保证达到产品图规定的加工精度和表面粗糙度等要求外，还应注意下述各点：

① 与枪管配合孔的轴线所在的铅垂面应与导轨两内侧面的对称平面重合，并与机匣上

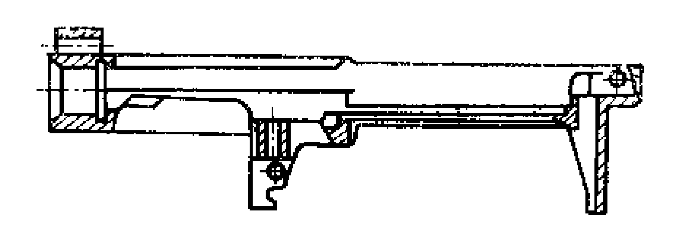


图7-4　56式7.62mm半自动步枪机匣结构示意图

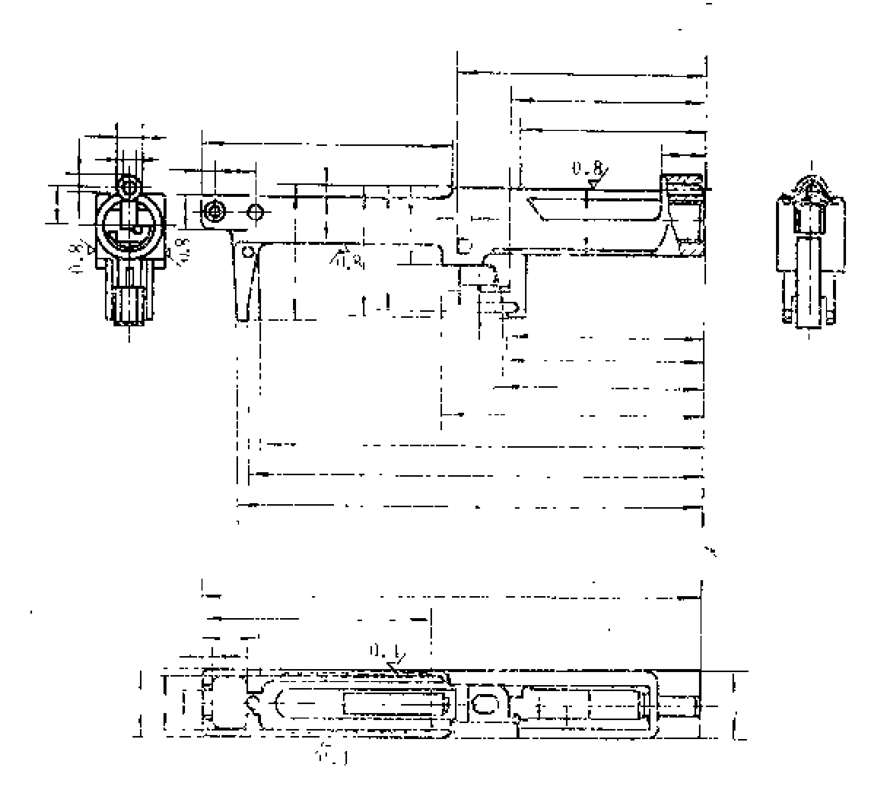


图7-5　56式7.62mm半自动步枪机匣

平面垂直；

② 顶杆孔的轴线应与枪管孔的轴线在机匣对称面内平行；

③ 闭锁闩孔的两对平面本身应平行，且垂直于左侧面和上基准面；

④ 前、后支座的侧面应与机匣两侧面对称，支架扣槽和销孔的轴线应重合；

⑤ 与击发机配合的前支座耳孔应与其两侧面垂直；

⑥ 空仓挂机T形槽应在机匣纵向铅垂平面内，并垂直于上基准面；

⑦ 弹仓槽应与机匣两侧面对称；

⑧ 机匣盖闩孔应与右侧面垂直。

（2）工艺基准的选择

分析图7-5可以看出，该机匣的设计基准是与前面对矩形机匣的分析相似，其中绝大多数设计尺寸都是由机匣的对称纵向平面、上平面和前端面三个基准进行标注的，所以56式7.62mm半自动步枪机匣的设计基准是：通过与枪管配合孔的纵向对称平面、机匣的上平面和前端面。

从理论上讲，应选择上述三个设计基准为加工中的定位基准，以贯彻基准重合原则，但纵向对称平面是个抽象的平面，不能用作定位基准，再加上与枪管配合孔的长度较短，难以

保证各表面之间的技术要求，故采用右外侧面为工艺基准，并提高横向宽度尺寸的公差要求，取其为对称度允差的2倍，即0.1mm（参见图7-3）。另外，机匣的上平面长度亦短，欲作到定位可靠，可将与机匣盖相配合的上平面也一起选作定位基准，但又考虑到若以该两个上平面定位加工内槽，会使夹具结构复杂，而且操作使用不方便，所以选择机匣下平面为定位基准，这样又会产生基准不重合误差，为了保证机匣两端高度尺寸（即机匣两上平面至下平面距离）的尺寸精度要求，必须进行尺寸换算，提高机匣两端高度尺寸的尺寸精度来实现。该机匣经工艺尺寸链计算，精度提高后的机匣两端高度尺寸分别为$31_{-0.05}^{\ 0}$mm 和$16_{-0.05}^{\ 0}$mm。所以56式7.62mm半自动步枪机匣机械加工的定位基准是机匣的右外侧面、底平面和前端面。

此外，还需说明一点，由于装配和尺寸标注及加工方便等原因，某些加工表面在加工中并不完全采用上述三个定位基准，而是采用其他表面（如机匣后端面、空仓挂机槽及前支座耳孔等）定位进行加工的。

（3）加工方案分析

56式7.62mm半自动步枪机匣的加工方案，具体按下述三个阶段进行分析。

第一阶段　在本阶段的加工中，需加工出定位基准，去除大部分余量，获得机匣的初步外形。

为此，如前所述。应首先加工出相互垂直的定位基准：两外侧面、上两平面和前端面。具体加工顺序是：高速铣两侧面，磨两外侧面，粗铣上部两平面，精铣上部两平面，粗铣前端面，精铣前端面（精铣前端面和加工与枪管配合孔集中在一道工序中完成，也可车端面以便保证孔与端面的垂直度要求，这样须将与枪管配合孔的加工工序提前进行）。然后，再加工机匣的大部分余量和初步形成机匣外形，包括机匣后端面、下平面及前后支座的加工。加工方法仍是采用粗铣、精铣，具体加工顺序视情况而定，一般先进行外形粗加工，然后再对辅助基准进行精加工；也可根据加工的方便程度，交错加工各相关表面。

在完成各基准面的加工后，应分别安排一道检验工序，以确保基准的准确性。

第二阶段　在本阶段的加工中，要使大多数表面达到产品图的要求，少数需精加工表面留有必要的加工余量，以便在热处理后进行光整加工。具体加工部位和加工顺序是：铣、钻前、后支座的表面、孔槽及其他部位的销孔（包括为加工内槽和闭锁闩方孔的下刀孔），拉闭锁闩方孔，铣内槽，击锤槽，弹仓槽，空仓挂机槽，到位保险杆孔槽，钻、铰顶杆孔，铣机匣盖扣笋槽，抛壳槽及机匣头部外形，高速铣枪机槽底並倒角，最后经钳工修整和检验工序合格后，送交热处理。

第三阶段　本阶段在热处理后进行。主要任务是对配合表面进行精加工，如精铣后支座以保证击发支架的装配尺寸，精铣机匣盖导向面以使机匣导轨连接齐平，精铣枪管孔並进行尺寸分组。此外，在本阶段加工中还要清除机匣上各表面的残渣、钳工校正由于热处理引起的变形，最后对机匣表面进行抛光，刻厂标、年号，并进行最终检验（包括磁力探伤）。

2．56式7.62mm冲锋枪接套（枪管座）的加工分析

（1）接套的加工特点和定位基准的选择

56式7.62mm冲锋枪的接套（图7-6）是冲铆机匣的重要组成部分，它与冲压的机匣体通过铆钉固连成装配式机匣。接套与矩形整体机匣的机械加工过程差别较大，特别是在机匣内槽加工方面。冲铆装配式机匣内槽的技术要求是在机匣装配过程中保证的，而矩形整体式机匣内槽的技术要求是经机械加工直接保证的，因此，在接套加工中基本上没有内槽加工问

题，从而较大地简化了接套的机械加工工艺过程。

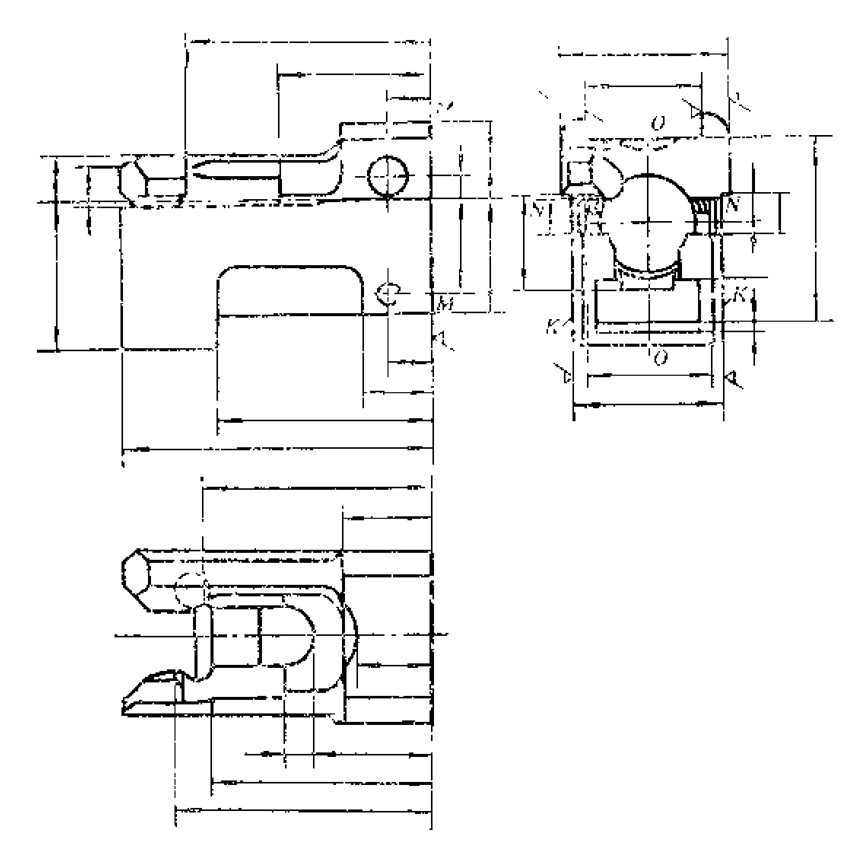


图7-6 56式7.62mm冲锋枪接套

分析图7-6可以看出，该接套的设计基准是接套的前端面M、定位台肩面N及与枪管配合孔的纵向对称面O-O。但由于纵向对称面为抽象平面，不宜作定位基准，故选接套下部外侧面K为定位基准，并将其宽度尺寸公差取两侧面与对称面对称度允差的2倍（即2×0.05mm$=0.1$mm）。这样接套机械加工的主要定位基准是：前端面M、定位台肩N及下部外侧面K。

（2）接套机械加工方案分析

56式7.62mm冲锋枪接套的机械加工可分为三个阶段。

第一阶段　本阶段主要是加工出几个定位基准，以保证整个加工过程的顺利进行。具体加工顺序是：铣两外侧面，磨两外侧面，铣上台阶面，铣前端面；加工中以外侧面为定位基准，并须保证左外侧面、上台阶面的大平面及前端面互相垂直。再利用上述三个面作定位基准，加工接套后端面、下台阶面、下部外侧面及定位台肩，加工方法仍是粗铣和精铣，机械加工后须进行检验。

第二阶段　本阶段的机械加工是以下部左外侧面K、定位台肩N和前端面M为主要定位基准，粗、精加工接套上各个表面，除几处重要表面（如3mm右旋螺旋面、与枪管配合孔、导轨槽、枪机配合孔）留有一定加工余量外，其余表面的加工精度、表面粗糙度均须达到产品图的要求。

本阶段在安排机械加工顺序时，必须注意到，将加工余量大、加工精度要求高或难于加工的工序安排在前面工序加工，对一般工序，则只需考虑尺寸标注的先后次序及有关技术要求等细节即可。具体加工顺序是：粗（钻或扩）、半精（镗）加工与枪管配合孔、衬铁室及枪机

配合孔，铣两处下斜面，粗、精铣抛壳口和表尺座槽，粗加工3mm螺旋面。其中枪机配合孔安排在抛壳口加工之前，因为抛壳口加工后将使枪机配合孔的加工出现不连续切削现象，难以保证枪机配合孔的加工精度和表面粗糙度；3mm螺旋面加工安排在抛壳口加工之后进行，因为抛壳口加工以后可使螺旋面显露出来，便于加工（图7-7）。

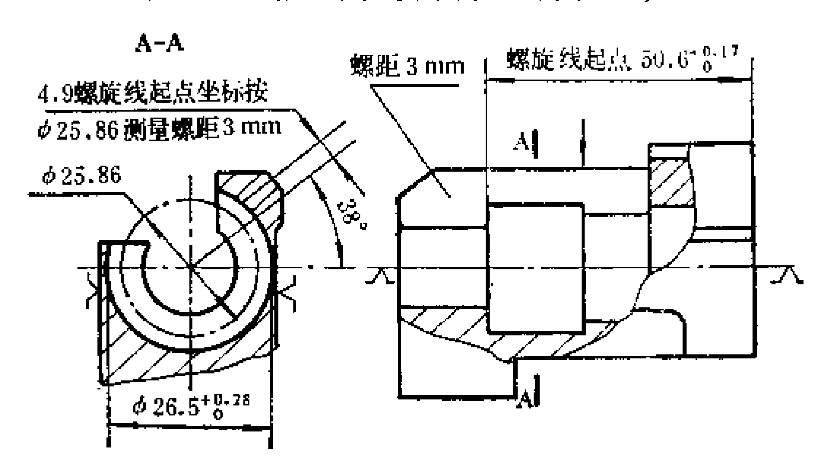


图7-7　56式7.62mm冲锋枪接套螺旋面加工工序图

接套上其他表面的加工顺序，要在考虑保证其尺寸精度、表面粗糙度的同时，还得兼顾到改善加工条件统筹安排。例如图7-8中，铣上弹坡22°和4°30′安排在铣进弹口宽度之后，铣弹匣口30°斜面安排在铣卡钩槽之后，铣衬铁槽45°倒角安排在铣衬铁槽之后加工。这种安排方法都是因为后一道工序的尺寸是从前一道工序的加工表面标注的。而加工后部90°槽安排在上弹坡加工之前进行，则是因为这样可以改善角度铣刀的工作条件，并减少上弹坡加工的余量。此外，还有部分表面的加工顺序，其本身并无严格要求（如铣左侧上部30°斜面，粗铣导轨槽，铣铆钉槽及圆弧等），只是为了便于组织生产作了适当的工序集中。

第二阶段机械加工结束后需安排修整工序、检验工序，然后送交热处理。

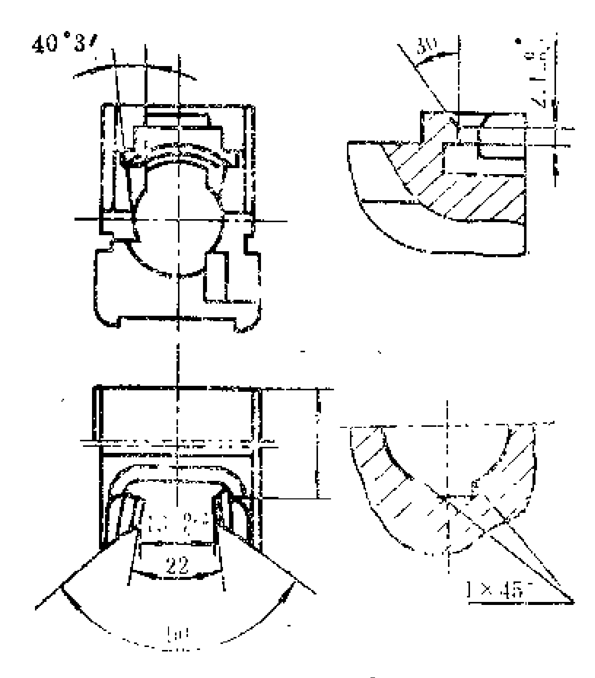


图7-8　56式7.62mm冲锋枪接套工序图

第三阶段　本阶段加工安排在热处理之后进行。其主要任务是精加工与其他零件、部件的装配基准，纠正热处理引起的变形及表面粗糙度不足，使接套的全部尺寸均达到产品图的

最终要求。比如精铰与枪管配合孔，精铣导轨槽、精加工3mm右旋螺旋面，以及与枪管配合孔的孔口圆弧等部位。加工结束后安排有修整工序和终检工序，以确保产品质量。

综前所述，可以把矩形机匣（或接套）机械加工工艺过程的一般顺序归纳如下：

① 加工全部外表面，並磨两外侧面；

② 加工相互对称的内槽；

③ 加工与枪管配合的表面（圆柱孔或螺纹孔）；

④ 加工与供弹、抛壳、退壳、闭锁及枪架等机构相连接的部位；

⑤ 热处理；

⑥ 精加工及修整加工；

⑦ 磁力探伤；

⑧ 表面处理。

二、圆筒形机匣的机械加工工艺过程

圆筒形机匣和矩形机匣的结构型式不同，机械加工方法及工艺过程也有所不同。下面以56式14.5mm高射机枪机匣为例，分析一下圆筒形机匣的机械加工工艺过程。

（一）定位基准的选择和机械加工工艺特点

由图7-2可以看出，56式14.5mm高射机枪机匣的设计基准是内孔的轴线，机匣前端面和圆周上的对称槽。贯彻基准重合原则，应选择上述设计基准为定位基准，但内孔轴线是抽象的轴线，不能用作定位基准，而是选用内孔表面为定位基准，间接体现出内孔轴线的。

由于机匣是圆筒形的，体长而壁厚较薄，且在圆周上开有直槽和成形槽，加工精度和表面粗糙度要求比较高，机械加工中的主要问题是保证同轴度和对称度要求，故一般按互为基准、反复加工原则进行加工。因此与矩形机匣的机械加工工艺过程不同。

（二）机械加工方案的分析

56式14.5mm高射机枪机匣选用的毛坯，有圆钢棒料型材和无缝钢管型材两种，由于圆钢毛坯的金属材料利用率低，工艺过程复杂，环形钻孔困难，现在应用较少，而无缝钢管毛坯就可以克服圆钢不足之处，现被广泛采用。以无缝钢管型材为毛坯的圆筒形机匣机械加工方案大致过程如下：加工的第一道工序是荒加工内、外圆表面，根据机匣的结构特点，在粗加工外圆后，即进行热处理，目的是减少热处理变形对机匣加工质量的影响。在热处理后，再对定位基准（内孔及前端面）进行粗、精加工。由于机匣内、外圆表面的同轴度要求较高，加工中采用互为基准，交替地加工外圆和内孔。一般先以内孔定位加工外圆，然后以加工过的外圆定位，粗、精加工内孔，并达到产品图的要求，得到第一个定位精基准（内孔）；然后以内孔为基准定位，加工与之相垂直的前、后端面，切出全长，得到第二个定位精基准（前端面）；以后即可精车外圆各表面及与枪管结合的部位，使机匣多数表面在外形和尺寸方面达到产品图的要求。关于机匣上的对称槽及一些平面的加工，由于它们在加工中，也是以内孔。前端面为定位基准，但为了保证其正确的相对位置，尚需一个周向定位基准，因此，要选定一个槽或平面，並预先加工出来。显然，从定位精度高，夹具结构简单，安装可靠及操作方便等方面考虑，上槽的尺寸精度高而且面积大，选作定位基准比较合适，所以加工中要先加工出上槽，然后以上槽、内孔及前端面为定位基准分别加工其他各槽及平面，以保证各槽的相互位置关系。与此同时，可穿插安排一些次要表面的加工，最后，光整加工各主要配合槽和抛光内孔，使机匣各处均达到产品图的要求。

（三）圆筒形机匣机械加工工艺的一般顺序

通过上述分析，结合56式14.5mm高射机枪的机匣，可归纳出圆筒形机匣机械加工工艺过程的一般顺序如下：

（1）荒加工外圆及内孔，切端面；

（2）粗车外圆；

（3）热处理；

（4）精加工内孔和端面（获得定位基准）；

（5）精加工外圆表面各部位及与枪管的配合部位；

（6）粗加工、半精加工定位基准槽；

（7）加工成形面及其它配合部位；

（8）精加工对称槽及其它重要配合表面；

（9）钳工修整及内孔抛光；

（10）磁力探伤；

（11）表面处理。

第四节　机匣主要工序的加工方法

一、矩形机匣主要工序的加工方法

（一）两外侧面的加工方法

由于矩形机匣两外侧面是机械加工中的定位基准，其宽度方向的尺寸公差已经加严，故尺寸精度和表面粗糙度要求都比较高，一般加工方法为先在立式铣床上或龙门铣床上进行高速铣削加工，然后在磨床上进行磨削加工，以达到对两外侧面的尺寸和表面粗糙度要求。目前采用的磨削方法有两种：一种是用端面磨床加工，将机匣置于回转磁力工作台上，见图7-9。装于磨床主轴上的端面磨轮高速旋转並可做轴向送进进行磨削。具体加工时是先磨出一个外侧面，翻转180°再安装，磨削另一外侧面。这种端面磨床的功率大，主轴刚性好，又不需设

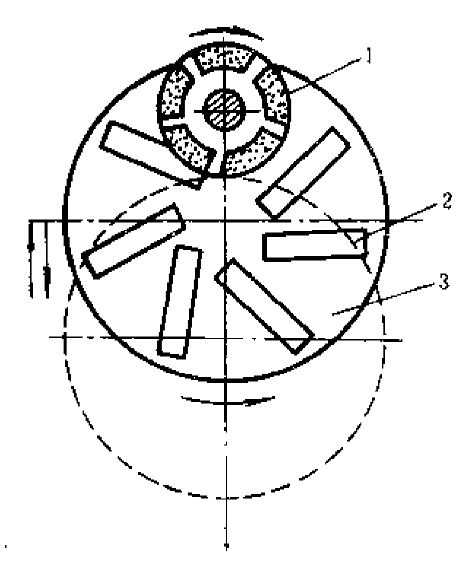


图7-9　回转送进端面磨床加工示意图

1—磨轮；2—工件；3—工作台

计专用夹具，在一次安装中可同时加工若干工件，生产率比较高。但缺点是工件被加工表面各处的送进速度不同，可能造成同一加工表面的表面粗糙度情况不一致，并且工件尺寸愈大，其表面粗糙度不一致程度也就愈大。

另一种磨削方法是采用工作台作直线送进的平面磨床加工，即一般的平磨加工。这种方法对于尺寸较大的机匣较为适宜，如67式7.62mm轻重两用机枪的机匣加工就是如此。

（二）机匣内槽的加工

机匣内槽主要指枪机槽和枪机框槽，它们是不通的阶梯槽，是机匣上的重要配合表面，加工精度和相互对称度要求比较高。加工方法一般采用多次铣削，经粗、精加工而成；少数对称槽采用拉削加工（如56式7.62mm轻机枪机匣的枪机框导轨槽加工）。

图7-10是矩形机匣内槽加工常用的加工方案简图。

工序	工序简图	机床
铣机框槽		卧铣
铣枪机槽		卧铣
铣机框槽前端	A A向	立铣
扩机框槽宽度	B B向	立铣
铣枪机槽前端		立铣
铣凹槽		立铣
扩枪机槽宽度		立铣
精铣枪机槽宽		立铣
精铣机框槽宽		立铣
钳工修平	钳工修平	钳台

图7-10　矩形机匣内槽加工方案

在图7-10的所有机械加工工序中，定位基准均为右侧面、上平面和前端面。工序数目和工艺过程的安排，视内槽的结构特点而定。在精铣对称槽时，应采用铣刀直径小于槽宽的立铣刀，分别对内槽两侧进行精加工，控制槽宽的方法有两种：一种是在普通立式铣床上，由控制工作台横向位置达到所要求的尺寸精度和对称度。这种方法控制内槽的对称度，取决

于工人的技术水平，同时每次操作要控制工作台的送进位置，故较费工时；另一种是采用双轴靠模铣床加工对称槽，这种方法生产率较高，所得内槽尺寸比较一致，但对称度要受到机匣宽度的影响，为了防止刀杆在铣削内槽时的变形，通常要增设保护杆，以提高刀杆的刚度，保证内槽的尺寸精度。

此外，机匣内槽会因热处理而发生变形，使机匣的加工精度和表面粗糙度降低，为此可对机匣进行校正和修整。

（三）与枪管结合部位的加工

前已述及，机匣与枪管结合方式有圆柱体过盈配合连接和普通螺纹连接两种，为此机匣上与枪管的配合表面也有对应的光孔和螺纹孔两种形式，这些配合表面的加工，一般采用已加工好的内槽定位，以保证孔与内槽之间的位置尺寸和对称度要求。机匣上光孔的加工与一般配合孔的加工方案相似，在此不再叙述，现仅就普通螺纹孔的加工作一论述。

普通螺纹孔的加工有两种方案。

1．在六角车床及螺纹铣床上加工

这种普通螺纹孔的加工一般分为三道工序进行。

（1）在六角车床上预加工阶梯孔；

（2）在螺纹铣床上铣制螺纹；

（3）热处理后用丝锥修整螺纹。

这种加工方案，由于用螺纹铣刀铣螺纹，故生产率较高；但螺纹的加工精度较低，并且螺纹底孔的加工和螺纹加工分为两道工序，需进行两次安装，会因安装误差影响内、外径的同轴度而形成螺纹的牙深不一致。

为了避免螺纹在加工中被碰伤，铣制螺纹工序可安排在直到淬火之前进行。

2．在车床上加工螺纹

这种加工方案也可分为三道工序进行。

（1）在车床上粗加工螺纹底孔；

（2）在另一台车床上精加工螺纹底孔并加工螺纹；

（3）热处理后用丝锥修整螺纹。

这种方案的加工，可用车刀在一次安装中加工出螺纹，所以螺纹精度较高；但加工操作不便，使生产率较低。

二、圆筒形机匣主要工序的加工方法

现仍结合56式14.5mm高射机枪的机匣讨论圆筒形机匣主要工序的加工方法。

（一）内孔的加工

由于56式14.5mm高射机枪机匣的内径尺寸较大，加工精度和表面粗糙度要求较高（尺寸精度为IT10级，表面粗糙度$Ra0.8$，长径比又很大，因此采用大直径深孔的加工方案。

当筒形机匣毛坯采用圆钢型材时，可分为四道工序进行。

（1）用环形钻钻孔；

（2）粗镗孔；

（3）精镗孔；

（4）珩磨孔（视需要进行）。

当筒形机匣毛坯采用无缝钢管时，可去掉用环形钻钻孔工序，其余工序相同。

（二）对称槽的加工

对称槽的加工方法主要是铣削。加工时，机匣内孔为其径向定位基准，外壁上已加工好的平面或初次加工得到的槽为其周向定位基准；机匣前端面为其轴向定位基准。铣削后，需进行修整和检验。

（三）开锁螺旋槽的加工

开锁螺旋槽的加工，要经过粗加工和精加工工序。粗加工主要是切除大部分余量，精加工最后保证产品图的要求。粗加工一般在立式铣床上用回转式靠模夹具来装夹，用机匣内孔、对称槽（与加速子配合槽）及前端面为定位基准，加工时，夹具带动机匣一起回转，并按照靠模装置给定的方向，同时作纵向送进，先加工出机匣一侧的螺旋槽，然后将机匣翻转180°，再加工另一侧的螺旋槽。这样粗加工出来的两侧螺旋槽对机匣轴线是不对称的，必须在精加工中予以纠正。

精加工螺旋槽，仍然采用靠模铣削，定位方式也与粗加工螺旋槽时相同。但加工的刀具是一把组合铣刀，横穿机匣内孔安装，可在一次加工中同时铣出两个螺旋槽，因此可保证两螺旋槽的对称度要求（图7-11）。加工时，机匣在夹具内沿靠模旋转并作纵向移动，完成送进运动，铣刀旋转完成铣削运动。

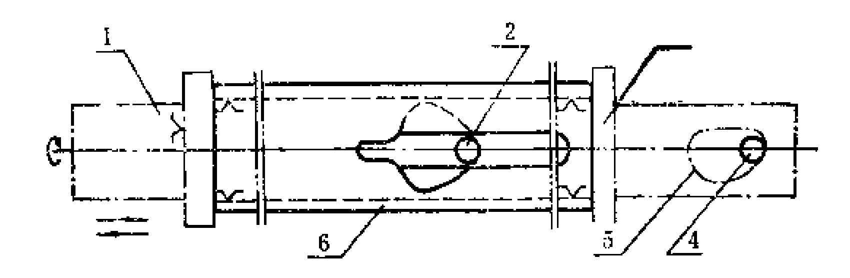


图7-11　56式14.5mm高射机枪机匣螺旋槽精加工示意图

1、3—夹具夹头；2—铣刀；4—固定靠模杆；5—靠铣表面；6—机匣

第八章　枪机制造

第一节　枪机的结构与技术要求

枪机是自动武器闭锁机构的主体零件。枪机体上用销连接着击针、拉壳钩等零件，并保证它们之间正确的相对位置。枪机本身或与枪机框一起，构成闭锁机构的重要部件，在自动武器的自动循环过程中，与其它机构的零、部件共同完成推弹、闭锁，击发、开锁和抛壳等动作。

机枪是在巨大的火药气体压力及频繁地冲击载荷作用下工作的，它直接承受火药气体压力，枪机上某些表面经常处于往复运动的干摩擦作用和火药气体的腐蚀作用，所以枪机的质量对自动武器工作的可靠性起着很大的作用。为了保证枪机工作的可靠性和具有足够的寿命，枪机应满足下述要求：

1．合理选择枪机材料和相应的热处理方法，并配合其它条件，以保证枪机有足够的强度、刚度和冲击韧性。

2．合理安排枪机的机械加工工艺规程，使枪机获得良好的尺寸精度、形状精度、位置精度和表面粗糙度。

3．采用适当的表面处理方法，使枪机具有良好的抗腐蚀能力和较高的耐磨性，满足枪机的使用寿命要求。

另外，枪机的结构复杂，加工表面多，一些表面的加工精度要求较高，表面之间的相对位置要求严格，因此枪机的机械加工的工艺流程长，工作量较大，加工比较困难，必须认真分析，慎重对待，以保证枪机的加工质量，提高自动武器的工作可靠性和各机构间动作的协调性。

本章主要分析枪机的机械加工问题。

一、枪机的结构

由于自动武器种类不同，闭锁方式不同，枪机的结构形式各异，种类也不同。从枪机的外形轮廓上分为非回转体枪机和类回转体枪机两大类。

（一）　非回转体枪机

非回转体枪机如图8-1所示。这种枪机的断面，一般接近于矩形或正方形，外形较规则。56式7.62mm半自动步枪、56式7.62mm轻机枪、53式7.62mm重机枪等自动武器的枪机均为非回转体枪机。

（二）　类回转体枪机

类回转体枪机的断面，一般为圆形或接近圆形。按其结构不同又可细分为实体轴形枪机（图8-2），空心轴形枪机（图8-3），以及套筒形枪机（图8-4）。

A-A

图8-1 53式7.62mm重机枪枪机

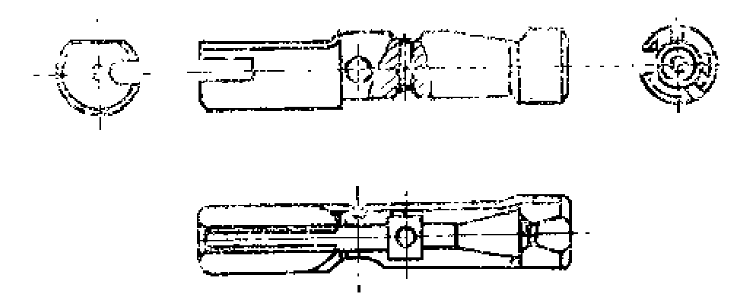


图8-2 54式7.62mm冲锋枪枪机

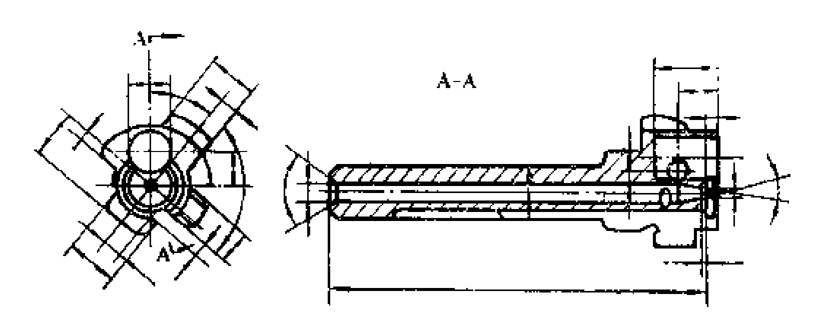


图8-3　56式7.62mm冲锋枪枪机

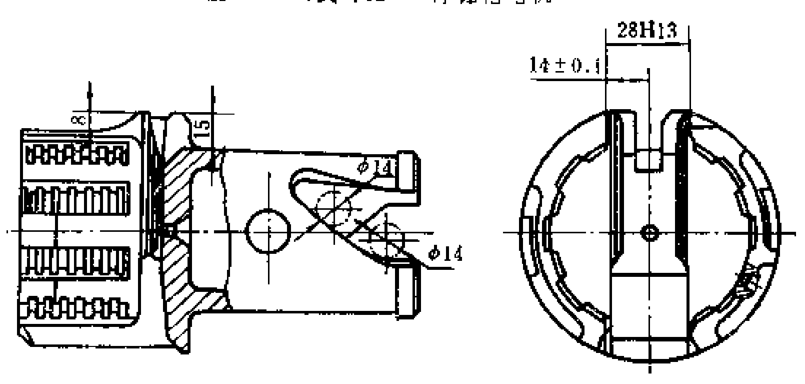


图8-4　56式14.5mm高射机枪枪机

由于枪机需协同其他零、部件共同完成一系列的自动循环动作，造成枪机的结构非常复杂，相应地在枪机上具有很多重要配合表面，一般有：

1．闭锁支承面；

2．开、闭锁斜面；

3．击针孔和击针销孔；

4．拉壳钩孔和拉壳钩销孔；

5．弹底窝孔；

6．与机匣、枪机框配合的表面；

7．与退壳挺配合的表面

8．击锤打击面；

9．推弹突笋面。

二、枪机的技术要求

对枪机的技术要求主要包括枪机上重要配合表面的加工精度要求、表面粗糙度要求和为保证枪机工作可靠的其他技术要求。

（一）枪机的加工精度要求。

1．枪机上各配合表面的尺寸精度一般为IT8～12级，少数尺寸为IT7级。例如：击针销孔为IT9级，拉壳钩孔及拉壳钩销孔为IT8～12级，击针孔为IT10～11级，退壳挺让位槽为IT12级，枪机全长为IT7～12级。

2．枪机上各孔的位置精度允差一般为±0.04～±0.08mm。例如，弹底窝孔与退壳挺孔之间的位置精度允差为±0.05mm，拉壳钩室孔与退壳挺孔之间的位置精度允差为±0.08mm。

3．对称度、同轴度允差一般为0.02～0.05mm。例如，63式7.62mm自动步枪枪机弹底窝孔与击针孔的同轴度允差为0.05mm

（二）表面粗糙度要求

枪机的表面粗糙度要求一般均取$Ra \leqslant 3.2$。例如，击针孔、拉壳钩孔和拉壳钩销孔的表面粗糙度均不低于$Ra1.6$；作为枪机装配基准的侧面，非回转枪机的底面，类回转枪机的外圆柱面，以及开、闭锁斜面，闭锁支承面，弹底窝平面等表面的粗糙度一般为$Ra1.6 \sim Ra0.8$；其它非工作表面的粗糙度一般取$Ra3.2$。

（三） 其它技术要求

1．为保证枪机的足够强度、冲击韧性和耐磨性等要求，枪机应具有一定的硬度，一般枪机的硬度应达到HRC44～52。例如，63式7.62mm自动步枪枪机硬度要求为HRC44～48，56式7.62mm冲锋枪枪机硬度则为HRC45～51。

2．对容易产生应力集中的突肩和凹部，应设计有倒角或圆弧，並在精加工或热处理后采用相应的强化处理工艺，提高其疲劳强度，保证足够的寿命。

3．为提高枪机的抗腐蚀能力，枪机表面一般需进行磷化处理。

4．枪机上不允许有任何裂纹。为此，枪机在热处理后应进行磁力探伤检验。

第二节 枪机的材料与毛坯

为了保证枪机有足够的强度和冲击韧性，热处理后能达到规定的硬度指标，枪机的材料一般采用低、中合金钢。常用的枪机材料为：30CrMnMoTiA（如56式7.62mm半自动步枪、56式7.62mm轻机枪的枪机），30CrMnSiA(56式7.62mm冲锋枪、56式14.5mm高射机枪的枪机),30CrNi3A（54式12.7mm高射机枪枪机）和35CrMnSiA（53式7.62mm重机枪枪机）等。

枪机的毛坯种类一般有型材和锻件两种，锻件又有自由锻件和模锻件毛坯之分。枪机毛坯的选择原则是：外型轮廓规则的矩形或方形枪机，一般选用型钢为毛坯；对于外型不规则的枪机，则一般采用锻件（模锻件为多）毛坯。锻件毛坯在机械加工前应进行正火或退火处理，以消除毛坯的内应力，并改善毛坯的机械加工性能。

第三节 枪机的制造工艺过程

一、类回转体枪机

如前所述，类回转体枪机包括实体轴形枪机，空心轴形枪机和套筒形枪机三种，由于它们的结构不同，所以其机械加工工艺过程也不相同，下面逐一分析。

（一）实体轴形枪机的机械加工方法

实体轴形枪机的加工，基本上与轴类零件的加工过程相同。一般可分为下述几个阶段：

（1）预加工阶段

预加工阶段的主要目的是：切去大部分余量，得到径向定位基准，为以后机械加工作准备。本阶段包括有校直、粗加工外圆及端面，打中心孔等工序。

（2）半精加工阶段

半精加工阶段的主要目的是：使一般配合表面达到产品图要求，个别需精加工表面留有少量加工余量。本阶段包括有车削外圆及端面，铣、钻、铰其他表面等工序。

（3）热处理

（4）精加工阶段

精加工阶段的主要目的是：修整热处理后的变形和缺陷，对留有余量的表面进行精加工，以全部达到产品图的要求。本阶段包括精车（或磨），修整及终检等工序，

（5）表面处理

在实体轴形枪机的机械加工过程中所采用的定位基准是中心孔（顶尖孔或外圆），枪机尾端面以及一个限制枪机回转自由度的孔、槽或平面，

（二）套筒形枪机的机械加工方法

套筒形枪机属于同轴零件，其一般加工方案是：

（1）粗车外圆及一端面；

（2）钻（或镗）内孔（以加工的外圆及端面为定位基准）；

（3）半精加工外圆、端面及其他部位（以内孔为定位基准）；

（4）热处理；

（5）精加工重要配合表面；

（6）表面处理（如磷化等）。

套筒形枪机机械加工中的定位基准是内孔（或外圆）、端面等，也有用内螺纹代替内孔作定位基准的。

（三）空心轴形枪机的机械加工方法

空心轴形枪机的机械加工是类回转体枪机中最复杂的一种，现结合56式7.62mm冲锋枪枪机来分析其机械加工方法。

1．定位基准的选择

分析图8-3可知，枪机上各表面的相对位置都直接或间接地由击针孔（或杆部外圆）轴线，弹底窝平面（或枪机前端面）及导轨面（或限制面）来确定的。例如，击针孔轴线确定了各个外圆表面及导轨面、压弹面等表面的径向相对位置；弹底窝平面确定了枪机前端面、闭锁支承面等表面的轴向相对位置，还决定了击针孔深度的轴向尺寸；导轨面确定了枪机绕轴线回转方向上各表面的周向相对位置。所以该枪机的设计基准是：击针孔（或杆部外圆）轴线，弹底窝平面（或枪机前端面）及导轨面（或限制面）。根据基准重合原则，应选上述设计基准为枪机机械加工中的定位基准，但击针孔轴线是抽象存在的，故选杆部外圆为径向定位基准，为了消除基准不重合误差的影响，经工艺尺寸链换算，将杆部外圆尺寸公差由0.12mm缩小到0.08mm。这样，枪机机械加工的定位基准是：枪机的杆部外圆、弹底窝平面和限制面。

2．枪机的机械加工工艺过程分析

枪机的机械加工工艺过程一般可分为三个阶段。

（1）第一阶段（共同基准的加工）

本阶段加工的主要任务是获得定位基准。

加工过程一般是先加工击针孔，然后加工其它表面，获得定位基准。这样既可做到基准重合，又兼顾到击针孔是一个精确的深孔，加工较困难，容易产生废品，尽早发现问题可相对节省工时和人力；同时以深孔定位来加工其他表面，比之以其它表面定位来加工深孔要方便些。即使以杆部外圆为径向定位基准时，也应先加工出击针孔，然后以击针孔定位加工杆部外圆，再以杆部外圆定位来加工枪机的其他表面。

总结工厂生产经验，56式7.62mm冲锋枪枪机第一阶段的加工顺序安排如下：

1. 铣枪机两端面；

2. 钻击针大、小孔；

3. 铰击针大、小孔；

4. 两端定中心孔；

5. 粗车杆部外圆；

6. 车前端面（得轴向定位基准）；

7. 车颈部外圆；

8. 半精车杆部外圆；

9. 钻、铰击针锥孔；

10. 磨杆部外圆（得径向定位基准）；

11. 铣限制面（得周向定位基准）。

（2） 第二阶段（半精加工）

本阶段的主要任务是加工枪机的外形，如闭锁支承面，开、闭锁螺旋面，枪机推弹部，弹底窝及各配合部位等。在本阶段的加工中，除重要配合表面需留出加工余量外，其余加工表面的加工精度和表面粗糙度均应达到产品图的要求。

本阶段的加工部位较多，工序安排较复杂，在考虑工序过程中，应贯彻先难后易的原则，即先加工那些精度高、加工困难、易出废品的表面，后加工那些加工过程中易受损伤的表面（如弹底窝平面），以便节省工时，保证产品的质量。

56式7.62mm冲锋枪枪机第二阶段的加工顺序安排如下：

1 铣枪机推弹部；

2 铣退壳挺槽及回转让位槽；

3 铣斜面；

4 铣闭锁支承面；

5 铣开、闭锁螺旋面；

6 钻，铰击针销孔；

7 锪弹底窝；

8 钻、铰拉壳钩销孔；

9 钻拉壳钩室孔；

10 车枪机后端面；

11. 铰击针小孔。

（3）第三阶段（精加工）

本阶段加工的主要任务是清除枪机热处理后的缺陷和变形，对枪机上留有加工余量的重要配合表面的精加工，从面使枪机全部尺寸及形状均达到产品图的加工精度和表面粗糙度的要求。加工方法主要是精铰、精铣、打磨及抛光等方法。

56式7.62mm冲锋枪枪机第三阶段的加工顺序安排如下：

1. 磨杆部外圆；

2. 精铣菱形突起圆弧；

3. 精铣退壳挺槽；

4. 精铣限制面；

5. 精铣枪机推弹部；

6. 精铰拉壳钩销孔、击针销孔；

7. 精铣前端面

8. 精铣弹底窝；

9. 精铣闭锁支承面；

10. 精铣开、闭锁螺旋面；

11. 精铰击针大、小孔；

12. 打磨弹底窝平面；

13. 精铣后端面；

14. 抛光推弹部下部圆弧。

在此必须指出，枪机机械加工的三个加工阶段中的各工序並不是连续进行的，在加工的各工序间适当穿插安排一些辅助工序和检验工序，如钻中心孔，清理毛刺、校直以及检验等，以确保枪机的加工质量。

枪机的热处理工序安排在第二阶段加工结束，第三阶段加工开始前进行，表面处理（如磷化）工序则安排在整个机械加工的最后进行。

二、非回转体枪机

非回转体枪机与类回转体枪机的结构形式不同，其机械加工工艺过程的安排也不同，现结合56式7.62mm半自动步枪枪机、56-1式7.62mm轻机枪枪机和53式7.62mm重机枪枪机分析非回转体枪机的机械加工工艺过程。

（一）定位基准的选择

图8-5为56式7.62mm半自动步枪枪机简图。从图上分析可知：枪机上的击针孔轴线，底平面和弹底窝平面为其设计基准，况且击针孔的尺寸精度和表面粗糙度要求较高，击针孔对击针销孔、拉壳钩室孔均有严格的位置精度要求；底平面是该枪机上最大平面，它与其他

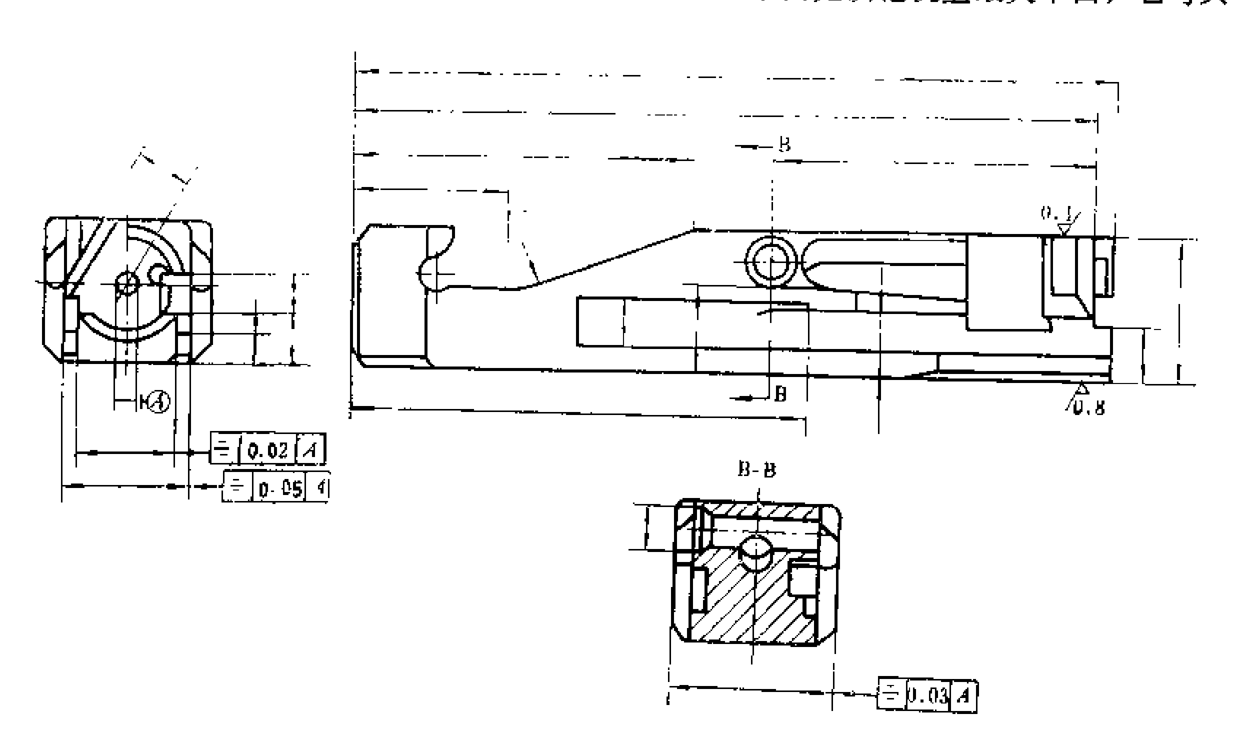


图8-5　56式7.62mm半自动步枪枪机

表面保持着一定的位置精度要求，表面粗糙度也较高，若以底平面定位，无论是加工，还是在夹具中安装都比较方便，而且稳定可靠；弹底窝平面对枪机的工作和加工均占有重要的地位，它又可作为检验的测量基准，兼顾及基准重合的原则，所以56式7.62mm半自动步枪枪机的机械加工选择击针孔、底平面和弹底窝平面为定位基准。

另外，对不同的枪机，从加工方便和保证产品质量的综合考虑，有时需要选择辅助定位基准。例如，56-1式7.62mm轻机枪枪机即采用击针孔，枪机的右侧面，上平面和前端面（或弹底窝平面)为定位基准（图8-6)，53式7.62mm重机枪枪机采用击针孔、枪机的右侧面、底平面和前端面（或弹底窝平面）为定位基准（见图8-1）。

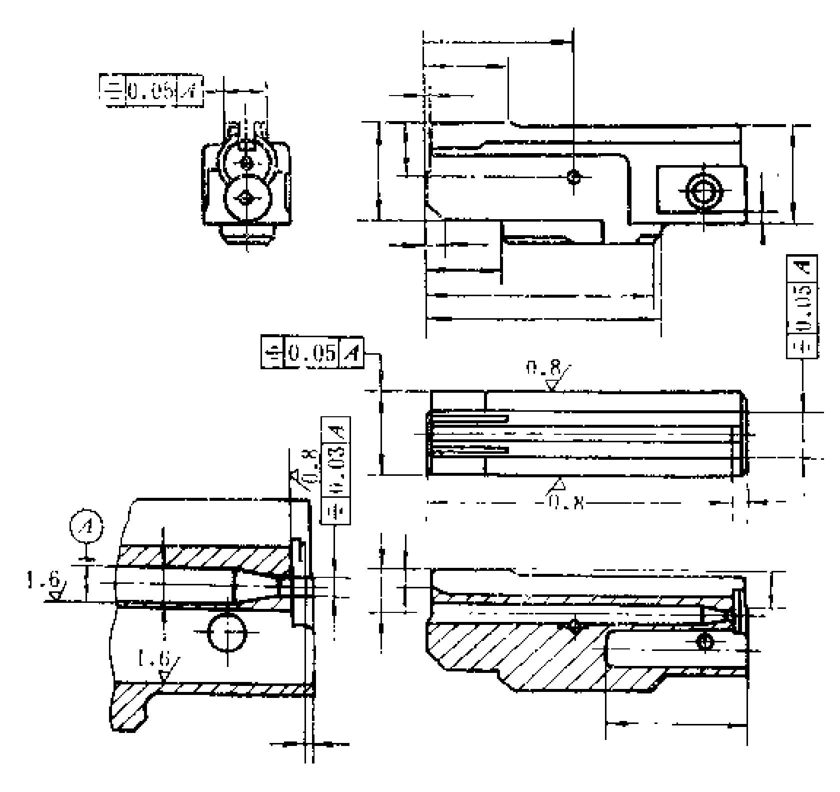


图8-6 56-1式7.62mm轻机枪枪机

（二）枪机的机械加工工艺过程分析

非回转体枪机的机械加工工艺过程一般也划分为三个阶段，各阶段的主要加工任务与类回转体的空心轴形枪机的主要任务基本相同。

1．第一阶段（共同基准的加工）

56式7.62mm半自动步枪枪机在第一阶段的加工过程，首先是铣出枪机的底面和两个端面；再以加工出的底平面和前端面、右侧面定位，钻、铰击针孔，经过粗、精加工击针孔，使其达到IT10级的尺寸精度和$Ra1.6$的表面粗糙度；然后以击针孔为定位基准，精加工底平面，调换位置铣削两侧面、后端面和前端面；在保证前端面与底平面成91°37′角度的基础上，再加工弹底窝，从而完成枪机定位基准的加工。

56-1式7.62mm轻机枪枪机和53式7.62mm重机枪枪机在第一阶段的加工过程，首先是加工出外部基准及精确的击针孔；再以击针孔为定位基准，精加工枪机的右侧面、上平面（或底平面）及两端面（或后端面）；然后以右侧面、上平面（或底平面）为定位基准，加工弹底窝平面，从而完成枪机定位基准的加工。

2．第二阶段（半精加工）

56式7.62mm半自动步枪枪机在第二阶段加工中的主要任务是以已加工好的定位基准定位，加工一些重要表面和成型表面，除重要表面预留出一定的加工余量外，其它表面的尺寸和表面粗糙度均须达到产品图的要求。例如，以击针孔、弹底窝平面及右侧面为定位基准，钻、铰击针销孔，保证击针销孔至击针孔以及弹底窝平面的位置尺寸精度；以底平面为定位基准，加工退壳挺槽、弹底窝缺口等；以弹底窝平面定位，靠模铣拉壳钩槽，保证拉壳钩槽至弹底窝基准点假想线的尺寸精度要求，从而保证工作过程中拉壳钩抓弹的可靠性。与此同时，还要完成一些圆弧、角度、沟槽等次要表面的加工，並增设倒棱、去毛刺等辅助工序。

56-1式7.62mm轻机枪枪机和53式7.62mm重机枪枪机在第二阶段的加工，同样是利用已经加工好的定位基准定位，加工重要配合表面和其他表面，主要包括钻击针销孔、拉壳钩销孔，铰击针销孔和拉壳钩销孔，以及其他一些配合孔的突肩、凹槽，闭锁面和其他部位的粗加工和半精加工。53式7.62mm重机枪枪机的弹底窝也在本阶段加工。

第二阶段加工完后，即可转入热处理工序。

3．第三阶段（精加工）

第三阶段的加工，主要是枪机热处理后对击针孔、弹底窝、击针销孔等重要部位的光整加工，精磨一些活动的配合表面（如上、下平面，闭锁斜面等），清除枪机的热处理缺陷和变形，从面使枪机全部达到产品图的加工精度和表面粗糙度要求。另外还可进行补充倒棱、去毛刺等修整加工和终检工序，最后对枪机进行表面处理。

第四节　枪机主要工序的加工方法

自动武器枪机加工的主要工序包括：

（1）五孔的加工；

五孔指击针孔、弹底窝孔、击针销孔、拉壳钩室孔和拉壳钩销孔。

（2）类回转体枪机的两螺旋和一轴的加工；

两螺旋是指闭锁支承面螺旋和开、闭锁的行程螺旋，一轴指与枪机框相配合的杆部外圆。

（3）非回转体枪机的基准平面的加工；

基准平面是指枪机的侧面、上平面和底平面等。

一、击针孔的加工

枪机的击针孔是一个阶梯形深孔，是枪机与击针的配合表面。因而既有较高的尺寸精度、表面粗糙度要求，又有较严格的相互位置精度要求（如阶梯孔各表面与弹底窝孔的同轴度，与弹底窝平面的垂直度要求等），以保证击针运动灵活，工作可靠。另外，击针孔还是枪机整个机械加工过程中的径向定位基准，其加工质量将对其它表面产生直接的影响，因而击针孔的加工应予以充分地重视。

（一）击针孔机械加工工序的安排原则

分析击针孔的结构可知，击针孔的加工难点是它的大直径部分，属精密深孔加工。为了减少钻孔时的走偏量，加工时的运动方式一般采用工件回转，刀具送进的方式进行。根据生产规模和具体的生产条件可按工序分散或工序集中原则来组织生产。为提高劳动生产率，保

证击针孔的加工质量（主要是各孔的位置精度），自动武器生产中较多采用工序集中，但也有采用工序分散原则加工的。例如，56式7.62mm半自动步枪枪机击针孔的加工是按工序集中原则安排的，击针大孔、小孔及锥孔等表面的加工工序集中在一道工序中，分六个工步在六角车床上进行。工步顺序为：

（1）钻击针孔中心孔；

（2）钻击针大孔；

（3）钻击针小孔；

（4）粗铰击针大孔；

（5）精铰击针大孔；

（6）铰击针小孔。

而某工厂加工56式7.62mm冲锋枪枪机击针孔则是按工序分散原则来安排击针孔加工的，其工序安排顺序为：钻击针中心孔，钻、铰击针大孔，钻、铰击针小孔，铰击针锥孔，其中，除钻击针大孔是在深孔钻床上加工外，其余工序都在立式钻床上加工。

（二）击针孔的加工方法

由前面分析可知，击针孔中心线是枪机的设计基准，而击针孔则是其机械加工过程中的定位基准，按照工艺过程的安排要求，击针孔一定要尽早加工出来。击针孔的整个机械加工过程，一般分成热处理前、后两个阶段。热处理前主要是对击针孔进行钻、铰加工，使孔的尺寸精度、相互位置精度和表面粗糙度基本达到产品图的要求，而热处理后则主要是对击针孔进行光整加工，最后达到产品图的全部要求。

在击针孔的加工过程中，加工方法主要是钻、铰方法。为了保证孔内各表面的同轴度要求，一般先加工出击针大孔；再以大孔导向定位，加工击针小孔和锥孔。在钻、铰击针小孔和锥孔时，所用钻头和铰刀的后部要有光滑的导向部分，最后加工是用手工精铰，从而保证击针孔的加工质量。

在此需说明的是，由于枪机的击针孔和击针销孔在结构设计上就是交叉的相贯孔系，为了在钻击针销孔时，钻头能连续切削且不发生走偏现象，通常采用两种加工方案。一种加工方案是，击针大孔的深度钻削加工分两次完成，第一次钻击针大孔时深度不达到击针销孔位置，待加工出击针销孔后，进行第二次钻销击针大孔以达到其深度要求，最后对击针大孔进行铰削加工；另一种加工方案是利用塞销方法加工。这个方法是，一次钻削击针大孔时就达到规定的深度要求，然后在击针大孔内塞入一个配合较好的销子（也称假击针），填满击针大孔空间后再钻击针销孔，保证它们之间的相互位置。这种方法能较好地保证击针孔的加工精度和表面粗糙度要求，也能保证击针孔和击针销孔的位置精度要求，对检验测量都比较方便，而且在击针大孔的孔壁上不产生毛刺，省去钳工修整毛刺工序，生产率较高，故应用较普遍。

为了保证击针突出量的要求，一般击针孔的深度尺寸是以弹底窝平面为基准标注的，因此击针孔的最终精铰时达到的深度要靠弹底窝加工以后的精加工来保证。

二、非回转体枪机的侧面、上平面及底平面的加工

非回转体枪机的侧面、上平面、底平面一般为枪机的设计基准，机械加工时又统用作定位基准，所以它们的尺寸精度、表面粗糙度要求较高，且与击针孔有较严格的位置精度要求。

加工中，一般是先加工出击针孔，然后以击针孔为定位基准，加工出定位用的一个侧面、上平面和底面，再以加工好的侧面定位，加工相对的另一侧面，达到产品图上规定的尺寸精

度和表面粗糙度要求。

各平面的粗加工、半精加工一般采用铣削方法，精加工则采用磨削加工，枪机装夹在专用夹具上加工。

三、类回转体枪机螺旋面的加工

自动武器上的螺旋面一般为直角螺旋面，即形成线的延长线通过并垂直于枪机轴线的螺旋面。类回转体枪机上的开、闭锁螺旋面，闭锁支承面均属此种。

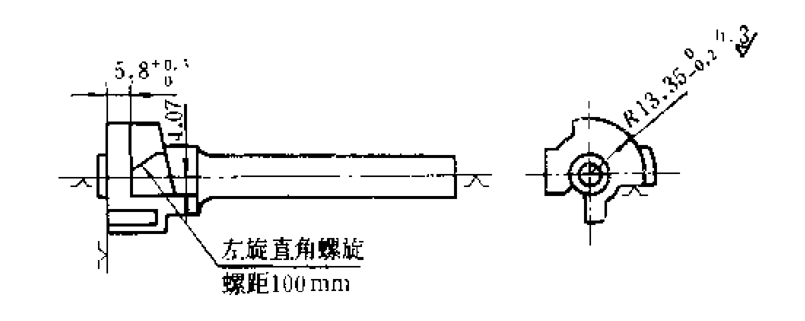


图8-7　56式7.62mm冲锋枪枪机开、闭锁螺旋面

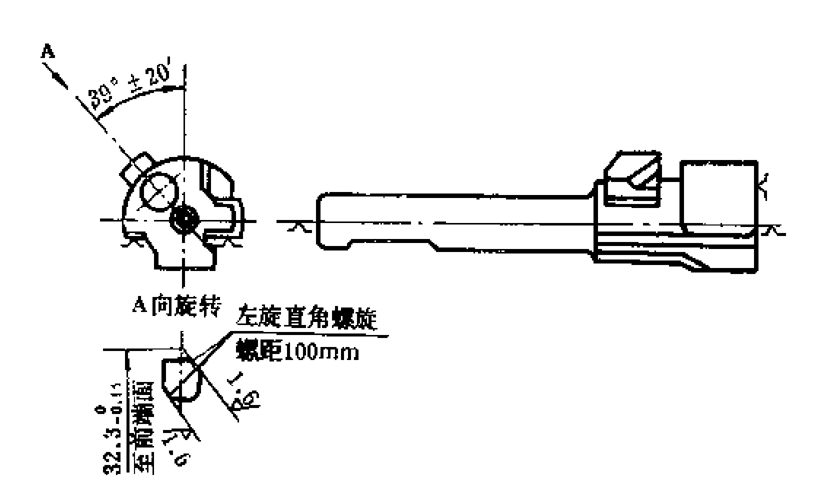


图8-8　63式7.62mm自动步枪枪机开、闭锁螺旋面

图8-7、图8-8所示为56式7.62mm冲锋枪枪机和63式7.62mm自动步枪枪机的开、闭锁螺旋面即为直角螺旋面的典型结构。

螺旋面的精度要求通常包括螺旋的起点位置、螺距和垂直度，螺旋面的加工方法有铣削和车削两种。铣削时，螺距由夹具回转和工作台纵向走刀保证，螺旋的起点和垂直度由调整机床、刀具和夹具的位置保证；车削时，螺旋的起点由刀具定点切入、定点停刀保证。

56式7.62mm冲锋枪枪机开、闭锁螺旋面的加工，可在立式铣床或靠模铣床上进行。加工时，定位基准为枪机的击针孔、前端面和导轨面，由专用夹具保证螺旋的起点，由靠模来保证螺旋的螺距。63式7.62mm自动步枪枪机开、闭锁螺旋面的加工，在立式铣床上配置专用夹具进行。加工时，同样以枪机的击针孔、前端面和导轨面为定位基准，由专用夹具保证螺旋的起点，但螺旋的螺距则是由夹具与机床的运动配合完成，即枪机安装在夹具中，一方面随工作台纵向进给作直线运动，另一方面随夹具与分度头一起作回转运动，当枪机旋转一周时，铣床工作台恰好移动枪机螺旋的一个螺距（它们的正确运动关系靠分度头与工作台丝杠间配置的挂轮达到，挂轮的配置方法与螺纹车床加工螺纹时方法基本相同）。

应该指出，为了铣出正确的螺旋面形状，必须使螺旋面的形成线通过並垂直于枪机轴线，亦即在铣削时，铣刀刀刃外圆与螺旋面相切的接触线通过枪机的轴线。图8-9所示为在立式铣床上确定铣刀位置的一般方法，先将铣刀外圆在通过枪机轴线的水平面内与枪机杆部外圆相切，然后将铣刀向上抬离工件，再向枪机方向移动一定的距离x。

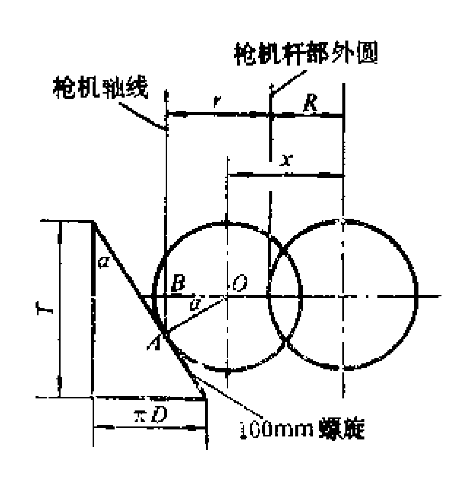


图8-9　63式7.62mm自动步枪枪机开、闭锁螺旋面铣削时的调整

现以63式7.62mm自动步枪枪机的开、闭锁螺旋面加工为例，说明并计算如下

图8-9中　$T=\pi D\operatorname{ctg}\alpha$

式中　T——螺旋螺距，$T=100$mm；

D——螺旋外径，$D=31$mm；

α——螺旋角。

代入数据，得$\alpha=\operatorname{ctg}^{-1}\dfrac{T}{\pi D}$

$$=\operatorname{ctg}^{-1}\frac{100}{31\pi}=\operatorname{ctg}^{-1}1.0286$$

$$=44°14'32''$$

另外，由图8-9知　$\alpha=\angle AOB$

$OB=R\cos\alpha$

式中　R——铣刀半径，$R=4$mm

由此考虑到杆部外圆至枪机轴线的距离$r=5.6$mm，

则得　$x=R+r-OB$

$=4+5.6-4\times\cos44°14'32''$

$=6.73$mm

即铣刀外圆与枪机杆部外圆相切后，再向枪机方向移动6.73mm。

四、枪机弹底窝的加工

枪机上的弹底窝孔容纳枪弹的底缘部分，发射时，通过弹壳底部使火药气体压力传至枪机，弹底窝底平面直接承受火药气体压力。枪机上的弹底窝是一个加工精度和表面粗糙度要求较高的平底浅孔，其尺寸精度一般为IT9～11级，表面粗糙度为$Ra0.8$～$Ra0.4$，弹底窝孔与

击针孔的同轴度允差为0.05mm，弹底窝底平面不许凹陷，但允许略带突起（如56式7.62mm冲锋枪枪机的弹底窝底平面允许突出0.04mm）。

枪机上弹底窝的加工通常在六角车床上以工序集中原则进行的，一般分为四个工步。即

（1）粗锪弹底窝；

（2）精锪（或精车）弹底窝底平面；

（3）粗抛光弹底窝；

（4）精抛光弹底窝。

在此需要说明的是，这里的锪孔加工亦是一种孔的加工方法，机床可用立式钻床，也可用六角车床，刀具为类似扩孔钻的带有圆周齿和端面齿的锪孔钻，为保证被加工孔与对应孔的相对位置精度（同轴度或垂直度等），有的锪钻前面带有导向心轴，锪孔加工主要用于对圆柱沉头孔、锥孔、小突台的端面进行加工（详见金属切削原理及刀具设计）。

枪机弹底窝加工的安排一般在枪机的全部外形加工完成以后，拉壳钩室孔和击针孔的精加工及热处理之前进行。这样安排，一方面可减少生产过程中的碰伤，另一方面枪机上的弹底窝平面是上述表面加工的轴向定位基准。

56式7.62mm冲锋枪枪机的弹底窝的粗加工是在六角车床上进行的（图8-10）。

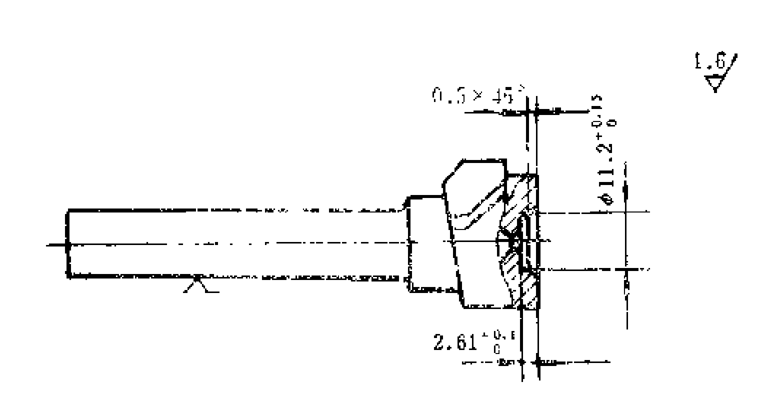


图8-10 56式7.62mm冲锋枪枪机弹底窝粗加工工序图

加工时，以枪机的杆部外圆定位，具体工步包括：

（1）钻孔；

（2）粗锪弹底窝；

（3）倒角；

（4）粗锪弹底窝底槽；

（5）精锪弹底窝底槽；

（6）精锪弹底窝。

在弹底窝整个机械加工过程中，精锪（或精车）弹底窝平面与砂弹底窝孔及底平面安排在热处理之后进行。这样安排，一方面可以保证弹底窝的表面粗糙度要求；另外，枪机上一些精加工工序（如磨闭锁支承面、铰击针锥孔、定枪机轴向长度等）是安排在枪机热处理后进行的，而弹底窝平面是枪机加工的轴向定位基准，所以，只有这样，才能满足产品图上一些轴向尺寸的精度要求。

56式7.62mm半自动步枪枪机的弹底窝粗加工工序图如图8-11所示。

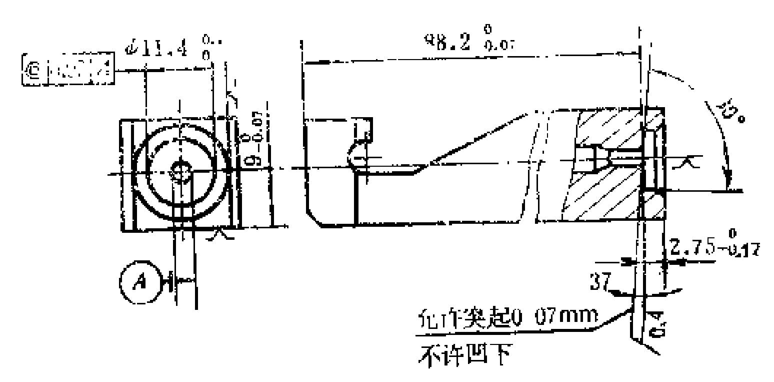


图8-11 56式7.62mm半自动步枪枪机弹底窝粗加工工序图

该枪机弹底窝的粗加工亦是在六角车床上进行的，枪机的底平面、侧面和后端面为加工的定位基准。具体的工步是：

（1）钻孔；

（2）粗锪弹底窝；

（3）精锪弹底窝；

（4）倒锐角；

（5）砂光弹底窝。

正如前面所述，为了保证弹底窝孔与击针孔的同轴度要求，锪弹底窝孔所用的锪钻前面带有定位心轴，加工时利用心轴插入击针小孔进行导向，锪钻夹持在机床的浮动夹头上，以便自动调整中心位置。为了达到弹底窝底平面至枪机后端面的轴向尺寸精度要求，在机床的床身上安装百分表，进刀时，刀架上的撞杆与百分表的触头接触，即可在百分表刻度盘上看出进刀深度，从而得到该尺寸。最后还需使用与弹底窝轮廓相吻合的缠有砂布的平头心棒对弹底窝进行砂光，以满足弹底窝所要求的表面粗糙度。

五、枪机上的击针销孔、拉壳钩销孔和拉壳钩室孔的加工

现结合类回转体枪机上的击针销孔、拉壳钩销孔和拉壳钩室孔的加工进行分析。

（一）击针销孔、拉壳钩销孔的加工

枪机上的击针销孔和拉壳钩销孔通常是直径小而深的孔，其尺寸精度、位置精度和表面粗糙度都要求较高，而且结构上分别与击针孔或拉壳钩室孔相贯通，有的击针销孔和拉壳钩销孔二者之间也相贯通，因而加工中容易出现打刀及定心不准确而影响孔轴线的直线度的问题，使加工造成困难。

图8-12为56式7.62mm冲锋枪枪机的击针销孔加工工序图，图8-13为63式7.62mm自动步枪枪机拉壳钩销孔的加工工序图。两图中两销孔的加工，大致上分为热处理前、后两个阶段，枪机热处理前的加工为粗加工和半精加工，主要是钻、铰孔工序；热处理后为两销孔的精加工，保证产品图对两销孔的尺寸精度和表面粗糙度的要求。

两销孔的加工方法相似，加工机床多采用立式钻床或多轴台式钻床，枪机装夹在专用钻模上，采用前已述及的塞销方法加工，定位基准为枪机击针孔(或杆部外圆)、前端面和左闭锁突笋下平面（或弹底窝壁），在枪机热处理前一般加工顺序为：钻大孔、钻小孔和铰大孔三个工步，也有只用钻小孔、铰大孔二个工步的；热处理后仅进行精铰孔工序。

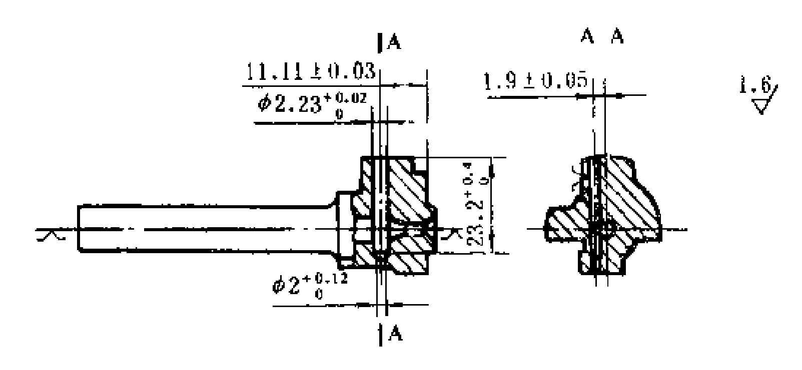


图8-12 56式7.62mm冲锋枪枪机击针销孔加工工序图

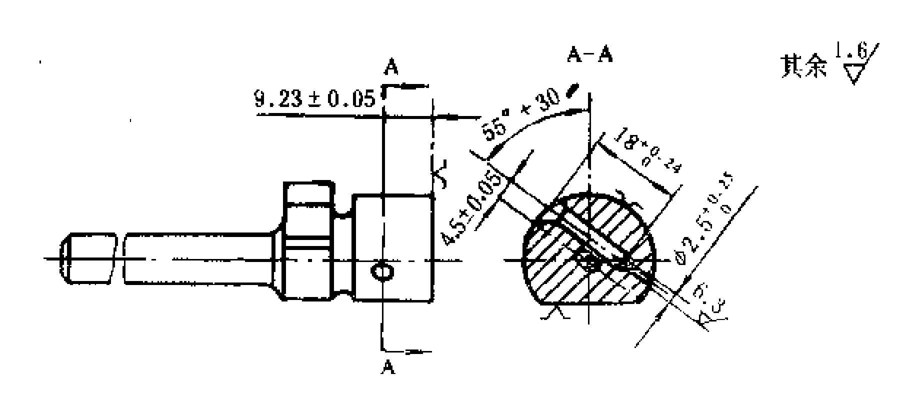


图8-13 63式7.62mm自动步枪枪机拉壳钩销孔加工工序图

（二）拉壳钩室孔的加工

枪机上的拉壳钩室孔为容纳拉壳钩的部位，该孔为盲孔，与拉壳钩销孔、弹底窝孔相贯通，属中等加工精度和表面粗糙度要求的孔。图8-14、图8-15、图8-16分别绘出了56式7.62mm冲锋枪枪机、63式7.62mm自动步枪枪机、56-1式7.62mm轻机枪枪机的拉壳钩室孔的简单结构和相关尺寸。

根据枪机结构的不同，拉壳钩室孔的机械加工过程安排也不相同。例如56式7.62mm冲锋枪枪机和63式7.62mm自动步枪枪机拉壳钩室孔和拉壳钩销孔之间为部分相贯，故拉壳钩室孔的加工须安排在拉壳钩销孔的加工之后进行，以防止钻头走偏；56-1式7.62mm轻机枪枪机拉壳钩室孔与拉壳钩销孔之间为完全相贯通，故拉壳钩室孔的加工可安排在拉壳钩销孔加工之前进行。

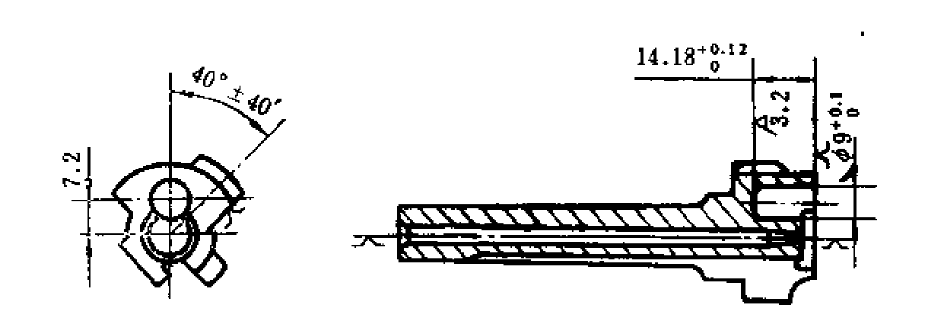


图8-14 56式7.62mm冲锋枪枪机拉壳钩室孔

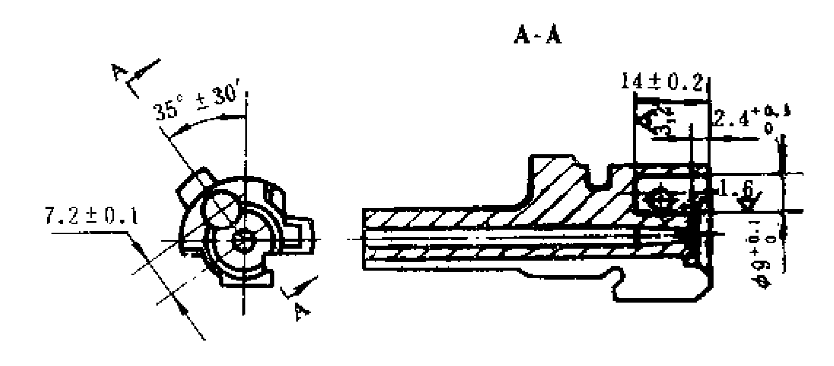


图8-15　63式7.62mm自动步枪枪机拉壳钩室孔

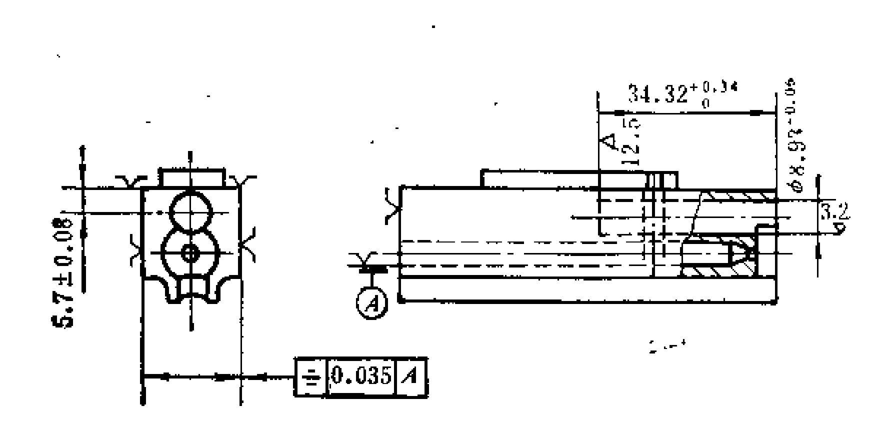


图8-16　56-1式7.62mm轻机枪枪机拉壳钩室孔

拉壳钩室孔的加工，通常在枪机热处理前在一道工序中完成，其中包括钻孔、平底、铰孔、平底四个工步，加工机床多采用多轴钻床，枪机装夹在专用钻模上加工，加工中的定位基准与其他工序定位基准相同。即56式7.62mm冲锋枪枪机的拉壳钩室孔的定位基准为枪机的击针孔（或杆部外圆）、前端面和限制面，56-1式7.62mm轻机枪枪机拉壳钩室孔加工的定位基准为枪机的两侧面、后端面和下平面，枪机热处理后不再对拉壳钩室孔进行精加工。

第九章　自动武器的装配

第一节　概　　述

根据自动武器的技术要求，将自动武器的零件、部件、组件结合为成品枪的全过程，称为自动武器的装配。

装配是自动武器制造过程的最后一个阶段，内容包括装配、调整、检验和试验等工作，装配质量的好坏将直接影响到自动武器的性能，因此，装配是自动武器制造过程的重要组成部分。

一、装配精度的概念

自动武器的质量，是以自动武器的工作性能、使用效果、精度和寿命等综合指标来评定的。自动武器质量的优劣，则主要取决于自动武器机构设计的正确性，零件的加工质量，以及自动武器的装配精度。

所谓装配精度是指：自动武器装配以后，及其工作过程中，各零件间所达到的相互尺寸、位置关系与其理想值之间相接近的程度。

自动武器装配精度包括：

（1）　相对运动精度

相对运动精度是指相对运动的活动机件之间在运动过程中，运动规律的准确程度。

如枪机框带动枪机在机匣内运动时，对自动武器轴线的平行度等。

（2）　相对位置精度

相对位置精度是指零件之间在相互位置关系上的准确程度。

如击发后的击针突出量，表尺与准星之间的相对位置，复进到位后枪机前端与枪管尾端面之间的间隙等。

相对运动精度是以相对位置精度的正确性为基础的。

（3）　配合表面间的配合质量

配合表面间的配合质量是指两个零件配合表面之间达到规定的配合间隙或过盈的程度。

配合质量影响着配合的性质。如枪管与机匣用光滑圆柱体过盈配合时的过盈量大小等。

（4）　配合表面间的接触质量

配合表面间的接触质量是指两配合和连接表面间达到规定的接触面积的大小和接触点分布的情况。

如闭锁时，闭锁支承面的接触情况，阻铁扣合量的大小等。

配合表面间的接触质量影响接触变形，同时也影响配合质量。此外，它们又对相互位置和相对运动精度的保证有一定的影响。

二、装配单元

装配的基本单元是零件。在装配过程中，由于自动武器的结构不同，形成的装配单元又

可分为部件和组件。部件一般由若干零件组成，成为独立的装配单元，但其从属于某一组件；组件一般由若干部件和零件组成，也可以由若干部件或若干零件来组成；组件也是装配的一个独立单元，是自动武器上的独立组成部分。如56式7.62mm半自动步枪与63式7.62mm自动步枪的自动机组件与发射机组件等。当组件很复杂时，又可分为若干分组件，如56式14.5mm高射机枪枪架组件又分摇架、托架、车体等分组件。

自动武器装配时，由若干个独立装配单元和零件经过不同的装配方法来完成各级装配单元之间的配合、连接、修配、调整而结合为成品的。为了便于组织生产，零件、部件、组件均按一定的规则进行数字编号，生产中以代号称呼相应的零件、部件、组件和成品。

自动武器零件和各级装配单元（零件、部件、组件）的编号，按有关标准进行，其基本形式如图9-1所示。

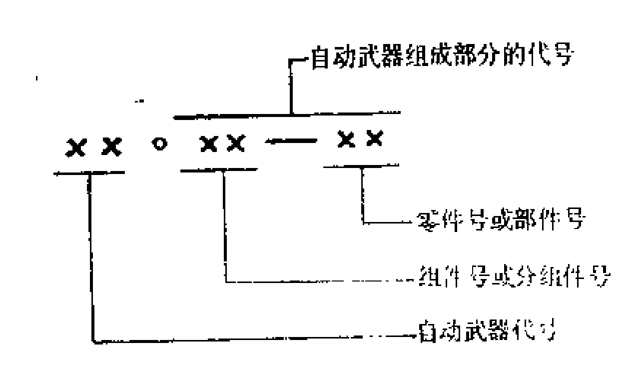


图9-1 自动武器装配单元编号的基本形式

其编号方法为：

产品总图号 00

组件图号 在产品范围内按顺序编定，如01，02，03，……010，011……；

部件图号 在组件或产品范围内以零为首，按顺序编定。例如：

从属于第一组件的部件图号 01—01，01—02，01—03，……01—010，01—011，……；

从属于第二组件的部件图号 02—01，02—02，02—03，……02—010，02—011，……；

直属于产品的部件号 00—01，00—02，00—03，……00—010，00—011，……。

零件图号 在组件或产品范围内按顺序编定，例如：

从属于第一组件的零件图号 01—1，01—2，01—3，……01—10，01—11，……；

从属于第二组件的零件图号 02—1，02—2，02—3，……02—10，02—11，……；

从属于第二组件的第一部件的零件图号02—01—1，02—01—2，02—01—3，……；

直属于产品的零件图号 00—1，00—2，……00—10，00—11，……；

三、装配系统图和装配工艺系统图

自动武器的装配过程和零件的机械加工过程一样，也是按照一定的工艺规程进行装配的，所以必须拟定装配工艺规程来具体指导自动武器的装配过程，以达到产品图及有关技术文件的技术要求。

各种自动武器都是由几十个（如手枪，某些冲锋枪），几百个（如63式7.62mm自动步枪有145个零件），甚至几千个（如56式14.5mm高射机枪有1981个零件）零件组成的。合

理地安排这众多数量零件的装配顺序，拟定出装配工艺规程，是件繁琐又重要的工作。为了方便起见，通常用图表方式表示该产品各装配单元之间的装配关系，这就是装配系统图。如图9-2所示。

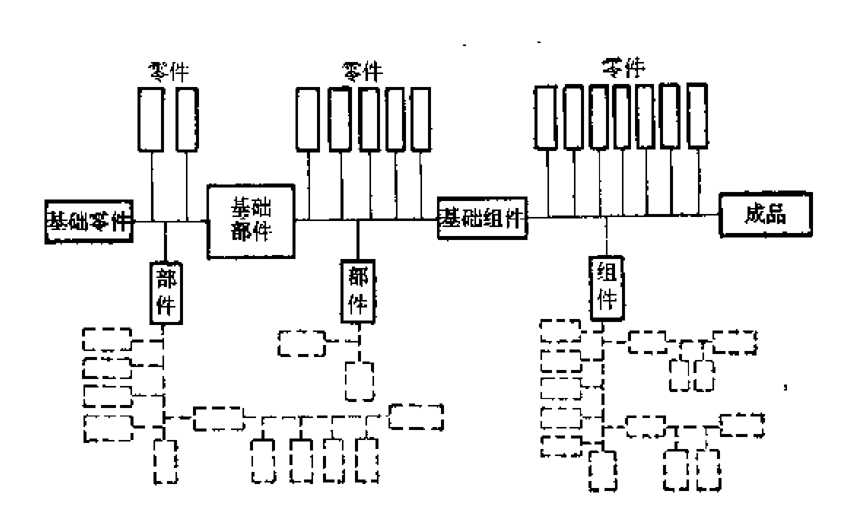


图9-2 自动武器装配系统图

绘制装配系统图方法如下：

（1） 先确定整个装配过程的基础零件、基础部件和基础组件。

所谓基础零件、基础部件、基础组件，就是能够决定该装配单元中各组成单元之间相互位置关系的零件、部件或组件。例如，56式7.62mm半自动步枪与63式7.62mm自动步枪发射机组件的基础零件为发射机座；枪身-机匣组件的基础部件为机匣部件；全枪装配的基础组件是枪身-机匣组件；

（2） 确定装配的组成单元

在分析相关产品图的基础上，将组成该部件、组件或产品的有关装配单元找出来，并将它们的装配顺序依次排列起来

（3） 绘制装配系统图

绘制装配系统图时，应从基础零件开始，由左至右依次标出基础部件、基础组件直至产品，中间用横线连接起来，再把基础零、部、组件以外的所有装配单元按装配顺序分别画在所属部、组件和产品的范围内，其中零件画在横线的上方，部件和组件画在横线的下方，其他部件、组件的装配关系也可依照相同方法画出，从而得到装配系统图。

在经过检查确实无误的装配系统图上，分别注上有实现装配技术要求的必要加工方法和注意事项等具体说明，这样就构成了装配工艺系统图，根据装配工艺系统图就可进行编制产品的装配工艺规程。

第二节 装配工艺规程的编制

自动武器的装配工艺规程是以文件形式确定下来的装配过程。它是指导整个产品装配工作的技术文件，也是制订产品装配生产计划和进行技术准备工作的主要依据，对于设计和改建一个厂，它又是设计装配车间或车间装配小组的基本文件之一。

自动武器装配工艺规程包括总装配工艺规程和分装配工艺规程两种，而总装配工艺规程，按自动武器射击试验前、后，又分为射前总装配工艺规程和射后总装配工艺规程两种。总装配工艺规程是针对自动武器总装配工作而制订的，而分装配工艺规程则是针对自动武器的部件、组件装配工作而制订的，不同的部件和组件，要编制各自的分装配工艺规程。

装配是自动武器制造过程的最后一个加工阶段，自动武器的质量最终由装配精度来保证。装配精度的高低，例如，零件、部件的连接是否准确可靠，接触情况、配合间隙是否合适，清洗、去毛刺等准备工作是否彻底，都直接影响到自动武器的性能和可靠性。装配不当，即使零件加工得很好，也不能达到对自动武器的战术技术要求，所以必须认真编制自动武器的装配工艺规程，确保装配质量。

一、装配工艺规程的内容及要求

自动武器装配工艺规程的内容，包括确定装配方法和装配的组织形式，拟定各级装配单元之间的装配工序、工步及其具体技术要求，确定各项要求的检验方法，选择各道装配工序的设备、所用的工具，提出装配过程允许和禁止的事项，计算装配的工时定额等。

在编制自动武器装配工艺规程时，要筹备下述原始技术资料：

（1） 各级装配图（如总装配图、组件装配图、部件装配图）及主要零件图；

（2） 产品验收技术条件；

（3） 生产纲领；

（4） 工厂的生产、技术力量及设备能力。

与此同时，在编制装配工艺的过程中，要注意到以下几点：

（1） 钳工的装配工作量应尽可能少；

（2） 装配周期尽可能短，提高劳动生产率；

（3） 占地面积尽可能小，节省生产面积；

（4） 确保自动武器的装配质量，并力求提高其质量。

二、装配工艺规程的编制步骤

（一） 分析图纸资料

通过分析各有关图纸及产品验收技术条件，对自动武器结构进行"尺寸分析"和"工艺分析"。所谓尺寸分析，就是对产品作装配尺寸链的分析和计算；所谓工艺分析，即是对产品的结构装配工艺性，零件的毛坯制造情况及机械加工工艺性的分析，从而全面了解自动武器的结构特点、零件的制造情况，熟悉与装配有关的尺寸及装配精度要求。

（二） 总装配、分装配的划分原则

在编制工艺规程时，具体到某些零件的装配应安排在总装配，还是安排在分装配，一般遵循下述原则：

1. 对结构上可以成为一个独立的装配单元，直接进入总装配的部件或组件，一般应划入分装配，其装配工作由分装车间完成。这样安排可保证进入总装配的装配单位是最少的，便于管理。例如，枪管-机匣组件，枪机组件等都应属于分装配。

2. 有些零、部件，从结构上分析是属于某一个独立的装配单元，但它同时可能影响到其它装配单元。从装配尺寸链中分析，这些零、部件与两个或几个装配尺寸链发生关系，而且又必须通过选择装配、修整装配或调整装配方法等达到装配要求，对于此种零、部件应将其划入总装配。

例如63式7.62mm自动步枪的机匣盖，从结构上考虑，它属于机匣组件，但它又与枪机组件存在装配关系，彼此之间互相连系保证自动武器的某些技术要求，装配时多用修配法，所以，机匣盖的装配应划入总装配中。

3．在结构上，有些零、部件可以结合成独立的装配单元，但它的装配技术要求又取决于其他装配单元，这些零、部件的装配也应划入总装配中。

例如，准星可以与枪身结合成独立的装配单元，但其装配质量却与机匣上的表尺位置相关，所以准星的装配应划入总装配，以保证瞄准基线正确。

4．仅有配合而无连接的零、部件，为避免混乱或运输中的失散，应划入总装配。

例如，56式7.62mm半自动步枪的活塞与活塞筒，它们之间只有径向配合关系而无连接，所以活塞应划入总装配，可防止丢失。

（三） 确定装配的组织形式

自动武器的装配组织形式是根据该自动武器的生产类型、结构特点而确定的。

装配的组织形式分为非流水装配和流水装配两种。

1．非流水装配

非流水装配的装配工作在固定的装配地点进行，每部产品由一名工人或一组工人自始至终地完成全部装配及调试工作，直到验收合格为止。

非流水装配的组织形式在装配时，可以不编制详细的工艺规程和严格划分工序，一般采用通用的设备和通用的刀、夹、量具，装配的工时定额也是粗估的。这种装配形式劳动生产率低，生产周期长，要求工人的技术水平高，适用于单件小批生产。比如自动武器的试制生产装配即属非流水装配。

2．流水装配

流水装配是按照固定的生产节律进行的，装配中要严格划分工序，工艺装备多采用专用的机床、刀具、夹具和量具。

流水装配分为固定流水式装配和移动流水式装配。

（1） 固定流水式装配

固定流水式装配是指装配的对象（产品、部件或组件）固定不动，全部操作工序都集中在一个工作地点，而工人则按一定的节律依次轮换工作，每个工人（或小组）所完成的装配内容固定不变的装配组织形式。

固定流水式装配适用于重型自动武器的装配，如56式14.5mm高射机枪枪架的装配即属此种固定流水式装配。

（2） 移动流水式装配

移动流水式装配是指装配对象（产品、组件、部件）不断地从一个工作地点移动到另一个工作地点，而每个工作地点都重复地进行着某工序的装配。这种装配形式按装配对象传送的特点，又可分为人工传送，机械传送（如用起重运输机械、车辆等），间歇式自动传送和连续式自动传送等四种。前面两种形式属于自由调节节律的移动流水式装配，其装配节律不严格固定，而且需要在各工序的工作地点存储少量备品，目前大多数自动武器的装配采用这种组织形式。后两种形式属于强制调节装配节律的移动流水式装配，是现代化大批量生产中较普遍的生产组织形式。

连续式自动传送的移动流水式装配的传送速度v可由下式确定

$$v=L/t \qquad (m/min) \qquad (9-1)$$

式中 L——两相邻装配工序工作地点之间的距离（m）；

t——本工序的装配工时定额（min）。

v值一般在0.25～3.5m/min之间选取。

流水式装配的每件产品装配周期T由下式确定

$$T=nt \qquad (min) \qquad (9-2)$$

式中 n——装配工作地点的总数或工人转换的次数，其中包括检验工序的数目。

（四） 划分装配工序

自动武器装配工艺规程的内容还包括确定工序数目、工序顺序、工序内容和装配中所需要的工装设备等。装配工序主要取决于产品的生产类型和技术要求。一般成批生产时，多采用工序集中的原则；大批量生产时，多采用工序分散的原则。但应注意，各道工序的工序时间都应大致相同，以保证各工序之间的节律平衡。特别是采用移动流水式装配时，为了保证节律相等，可以把选配、调整、修配等工时较长的工序，划分为若干工步，或在同一工序上平行设置若干工作地点，由若干工人同时完成同一工序的装配内容。另外，在重点装配工序之后，必须安排检验工序，以保证装配质量。

（五） 编制装配工艺文件

将自动武器装配工艺过程以文件的形式固定下来的技术资料称为工艺文件。

工艺文件一般有以下几种：

（1） 装配工艺系统图；

（2） 装配工艺规程；

（3） 装配工艺装置。

第三节 自动武器的装配方法

自动武器在装配过程中采用的装配方法，对保证自动武器的装配精度影响很大。装配方法的选择和确定，随自动武器的生产批量，其零件、部件、组件的结构特点，产品的技术要求和加工工艺性不同而不同，一般的装配方法有：

1．互换装配法；

（1） 完全互换装配法；

（2） 概率互换装配法。

2．选择装配法；

（1） 直接选配法，

（2） 分组选配法，

（3） 复合选配法。

3．补偿装配法；

（1） 修配法，

（2） 调整法。

下面详细加以说明

一、互换装配法

互换装配法是用控制零件的加工公差来保证装配精度要求的装配方法。一般分为完全互

换装配法和概率互换装配法两种。

（一） 完成互换装配法

完全互换装配法是，将参与装配的各零件（部件或组件）的有关尺寸，按规定的尺寸精度和表面粗糙度加工合格后，装配时不经任何选择、修配和调整，即能满足装配精度要求的装配方法。

完全互换装配法的装配原理就是尺寸链的极值解法。也就是说，参与装配零件的尺寸制造公差，都在装配精度要求的范围之内，只要零件加工合格，装配出的产品自然合格。

由尺寸链公式$T_{\Sigma L}=\sum_{i=1}^{m}|r_i|T_i$ 可知，当封闭环公差$T_{\Sigma L}$的值较小时，各组成环的公差T_i更小，这样造成加工困难，零件废品率增多，零件制造成本也随之增加。但完全互换装配法的装配过程简单，维修更换方便，所以对工人的技术水平要求不高，並且易于保持严格的装配节律，便于组织流水生产。在自动武器的装配中，完全互换装配法主要用于零件数目较少，尺寸关系较简单，及装配精度要求不高的情况。比如击针、一些弹簧等的装配。

（二） 概率互换装配法

概率互换装配法亦称为不完全互换法或部分互换法。利用概率互换装配法装配时，也是对参与装配的零件不允许进行选择、修配或调整，装好后即能达到装配精度要求的装配方法。所以也被认为是完全互换装配法的一种。

概率互换装配法的原理是尺寸链的概率解法。其实质是，从大批、大量生产的零件尺寸分布特性出发，适当扩大零件的制造公差，仍可保证绝大多数的零件能满足装配精度要求，只有极少数零件不符合装配精度要求（其中一部分零件可通过修整加以利用）。这样，概率互换装配法起到了降低参与装配零件的加工精度，减少制造成本的作用，使零件的生产经济性得以改善。

概率互换装配法基本上具备完全互换装配法的优点。对于生产批量很大，零件数目较多，尺寸相互关系较复杂且装配精度要求较高的装配情况是比较适宜的装配方法。

值得指出的是，概率互换装配法在自动武器的装配中应用不多。这是因为自动武器的零件形状比较复杂，功能特殊，一个零件通常与多个零件发生装配关系，从尺寸链角度来说，即是一个零件上的尺寸同时构成多个互相並联尺寸链，它是公共环。这样，只要其中有一个不合格，则其余的即便合格，也丧失了存在的意义，从而大大地浪费了人力和物力，这显然是不能允许的。另外少量不合格品的存在，可能形成自动武器使用和试验过程中故障和事故的隐患，这对自动武器的使用是不允许的，同时也给生产带来不必要的麻烦。

二、选择装配法

选择装配法是将有关零件按经济加工精度制造，在装配时，对参与装配的零件经过一定形式的选择进行装配，从而达到装配精度要求的装配方法。显然，选择装配法降低了零件的加工精度，仍可保证装配精度要求。

选择装配法按其选择形式又分为直接选配法、分组选配法和复合选配法（即综合法）。

（一） 直接选配法

直接选配法是在装配时，直接对被装配的零件进行挑选试凑装配，直到达到装配精度要求的装配方法。

这种装配方法比较简单，但挑选零件却要用较长时间，装配质量在很大程度上决定于工人的技术水平。因此，直接选配法多用于装配节律不严格，装配工序较简单的大批量流水装配中，比如自动武器中的拉壳钩及拉壳钩销、击针及击针销的装配。

（二） 分组选配法

分组选配法是在装配前将被装配零件按尺寸范围进行分组，装配时把对应组号的零件装在一起，使其满足装配精度要求的装配方法。

这种装配方法的优点是扩大了零件的制造公差，降低了加工成本，在同组零件中有完全互换性，且可得到很高的装配精度。缺点是增加了零件的存储量和零件测量分组工作，使得零件的贮存、运输工作复杂化。

下面结合7.62mm口径的自动武器的枪管与导气箍的装配说明分组选配法的分组方法。

根据产品装配技术要求规定，枪管与导气箍装配后，用一定的力矩检验不得松动，为此设计时把两者的配合选为过盈配合。如果完全靠零件的配合尺寸来保证，即采用完全互换装配法，则应选用过盈配合，如选 $\phi 16\frac{S6}{h6}$。

由公差表得枪管尺寸为 $\phi 16\,_{-0.011}^{\ 0}$，导气箍孔的尺寸为$\phi 16\,_{-0.036}^{-0.025}$由此得装配后的过盈量为

最大 $16-16_{-0.036}=0.036\text{mm}$

最小 $16_{-0.011}-16_{-0.025}=0.014\text{mm}$

从加工方面考虑，按IT6级来加工枪管和导气箍孔的配合部位是很困难的。为此，决定扩大枪管和导气箍孔的制造公差，采用分组选配法进行装配，来保证装配中过盈量的要求。

对采用分组选配法装配后，枪管和导气箍孔的配合尺寸确定方法如下：

取枪管、导气箍孔的经济加工精度为IT9级，则得扩大公差后枪管的尺寸为$\phi 16_{-0.043}^{\ 0}$，此时，枪管制造公差扩大的倍数为

$$\frac{0.043}{0.011}\doteq 4\text{（倍）}$$

为此，将枪管按尺寸分为四组，分组情况为

第一组： 16.000～15.989；

第二组： 15.989～15.978；

第三组： 15.978～15.967；

第四组： 15.967～15.957。

若保证原配合性质不变，即最大过盈量为0.036mm，最小过盈量为0.014mm，导气箍孔也应分为四组，对应于枪管第一组的导气箍孔第一组尺寸为

上限尺寸：15.989－0.014＝15.975mm；

下限尺寸：16.000－0.036＝15.964mm。

即导气箍孔第一组尺寸变化范围为：15.975～15.964mm。

同理得导气箍孔其他组的尺寸变化范围为

第二组尺寸：15.964～15.953mm；

第三组尺寸：15.953～15.942mm；

第四组尺寸：15.942～15.932mm。

分组结果整理如表9-1所示

表9-1 枪管、导气箍孔尺寸分组表

组　　别	枪管尺寸(mm)	导气箍孔尺寸(mm)
第 一 组	16.000～15.989	15.975～15.964
第 二 组	15.989～15.978	15.964～15.953
第 三 组	15.978～15.967	15.953～15.942
第 四 组	15.967～15.957	15.942～15.932

所以，导气箍孔的尺寸为$\phi16\ ^{-0.025}_{-0.068}$mm

枪管的尺寸为　$\phi16\ ^{0}_{-0.043}$mm

在应用分组选配法装配时应注意以下几点：

（1）　各装配零件的分组数要相同。分组数即等于公差放大的倍数（小数应取整）。

$$分组数=公差放大倍数=\frac{零件扩大后的公差}{零件原来的公差}$$

（2）　为了保证分组后各组的配合精度和配合性质、技术要求等不发生变化，各组配合件的公差要相等，公差增大时要向公差带同方向增大。

（3）　配合件的分组数不宜太多，以能达到零件的经济加工精度为原则。否则，零件的测量、分类、保管、运输及装配等都会复杂化，容易造成生产混乱。

（4）　分组选配时，零件的尺寸公差可以放大，但表面粗糙度、形状和位置公差必须保持原设计要求，不能随着零件尺寸公差的放大而降低其表面粗糙度要求和放大形状及位置公差，以保证装配精度要求和配合性质不变。

（5）　为了保证零件分组后，在装配过程中零件能顺利地进行配套，有关零件的尺寸分布规律应符合正态分布，这样才不会产生各组配合零件数量不等的情况。如果在加工中有某些因素具有较大影响，造成零件尺寸不是正态分布（图9-3），各组的尺寸分布就不一一对应，以致各组零件数相差悬殊。在生产批量小的情况下，由于不能配套，有时使装配工作不能正常进行。所以过一段时间，需专门加工一些配套件进行配套。

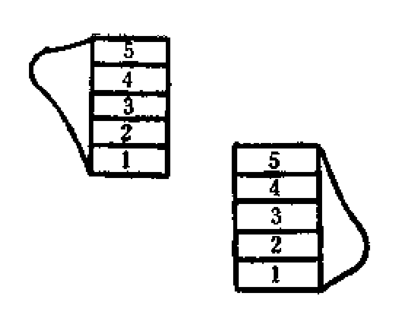


图9-3　孔和轴的尺寸非正态分布曲线

分组选配法多用于简单的三环（或四环）尺寸链，而封闭环精度要求很高的大批量生产的情况下，在自动武器装配中应用较多，比如自动武器枪管与接套（或机匣），枪管与导气箍、准星座、表尺座等的装配均采用分组选配法装配。另外一些民用产品，如发动机的活

塞与活塞销孔，气缸孔与活塞裙部的装配也是采用分组选配法。

（三） 复合选配法（综合法）

复合选配法是直接选配法和分组选配法的综合，亦称综合法。它是将零件预先测量分组，装配时再从各组中挑选合适的零件进行装配。

复合选配法的特点是配合件的公差可以不等，由于在分组的范围中直接选择装配，因此既能达到理想的装配质量，又能较快地选择合适的零件，便于保证生产节律。

复合选配法比直接选配法在装配时所需的时间要少，但需先行分组，所以总的装配工作量仍较大，装配时应全面考虑选用。

三、补偿装配法

补偿装配法包括修配法和调整法两种。

（一） 修配法

修配法是通过钳工或机械加工的方法对组成装配尺寸链的一个（或几个）组成环加以修整，从而满足装配精度要求的装配方法。

修配法多应用在产品数量少的单件、小批生产中，或在装配精度要求高，用完全互换法会使各组成环的公差很小，造成加工困难的尺寸链中。采用修配法，可按经济加工精度将各组成环的公差扩大，在装配时根据实际测量的结果来修配在尺寸链中选定的某一容易修配的组成环来达到装配精度的要求。在修配法中，被修配的零件叫修配件，该组成环叫做修配环。

修配法不仅适用于单件、小批生产，而且适用于成批、大量生产，特点是高精度配合的短尺寸链、多环尺寸链和非线性尺寸链（平面、空间尺寸链）。在自动武器的装配中应用很广，例如步枪和冲锋枪的击发机构、枪机、弧形表尺及枪刺的装配。比如56式7.62mm冲锋枪的弧形表尺的装配，由于弧形表尺的基准是枪膛轴线，与表尺板装配、表尺座和枪管的装配相关连，尺寸关系比较复杂，而弧形尺寸又直接影响瞄准基线的正确性，装配精度要求较高，如果采用完全互换装配法和概率互换装配法，必然使各零件的制造公差要求很高，甚至无法加工，利用选择装配法也不合适，所以采用修配法，装配时修锉表尺座弧形表尺曲线达到装配技术要求。

修配法的主要问题是如何确定修配环的预加工尺寸，使其有足够的而又是尽可能小的修配余量。这样，既可保证装配精度要求，又能减轻工作量，提高劳动生产率。确定修配环的预加工尺寸，一般可用尺寸链的极值解法，组成环很多时，也可考虑采用概率解法。具体解法可参考尺寸链原理有关部分。

在利用修配法装配时，对修配件的选择要注意以下几点：

（1） 修配表面应是利于加工的表面，面积要小些，形状规则的裸露表面。例如，键和键槽配合时，应选键为修配件；轴和孔配合时，以轴为修配件。

（2） 修配件应是易于拆装的零件，且拆装时不得损坏其他零、部件。

（3） 修配环尽可能不选用并联尺寸链的公共环，以免修配后满足一个装配精度要求而破坏已经达到装配精度要求的尺寸链。

在具体选择修配件、修配环时，要从全局出发，选取最佳方案，作到既保证装配质量，又能提高劳动生产率，同时减轻工人的劳动强度。

利用修配法进行装配，尺寸链中组成环的公差与封闭环的公差没有直接关系，组成环的公差可以根据经济加工精度适当扩大，便于制造，同时又能保证较高的装配精度。但修配法的

缺点是，零件不能互换，增加了测量和修配的工作量，要求工人的技术水平高且熟练，另外装配所需工时较长，生产率较低，而且生产节奏不强，不便于组织流水生产。

根据产品结构和生产的实际情况，在生产中还有其他修配方法，其目的仍是扩大零件的制造公差和保证装配精度的要求。下面例举几种简单说明。

（1） 研刮法

研刮法指研磨和修刮两种修配方法。

研磨法是将有相互配合的零件表面在经过精、细加工以后，在配合面上涂以研磨剂，并在相对运动过程中进行研合，直至达到规定的配合精度要求为止。研磨法多用于一些接触表面要求很高的配合表面，比如液压缸的柱塞和缸体的配合表面，柴油机供油系统的精密偶件（喷油泵的柱塞与套筒、喷油器的油咀体与针阀体）的配合表面。

修刮法是在配合表面涂以着色剂，并使配合表面相对运动，接触面上的高点由着色剂显示，然后用刮刀修刮掉高点，如此反复进行，直到达到要求的接触面积为止。比如机床导轨表面，火炮摇架耳轴与托架耳轴轴承铜瓦的配合面。

（2） 自身加工法

自身加工是利用自身刀具加工某一部位的修配方法。一些不要求互换的零、部件，当其位置精度要求很高时，可用此法加工。比如，刨床利用刨刀刨削其工作台面以保证滑枕与工作台面的平行；立式铣床用铣刀铣削其工作台面，以保证主轴与工作台面的垂直；车床用车刀车削三爪卡盘，以保证卡爪的轴线与回转轴线同轴以及导轨与卡盘孔中心平行等。这种方法多用于机床制造中。

（3） 合并加工法

合并加工法也叫配制。此法是将两个或多个零件先夹固在一起，然后一起加工相关部位的方法。这种加工方法可减少累积误差，修配工作量也大为减轻，多用于两个或多个零件的连接部位加工中，如销连接中的销孔加工，螺纹连接中的螺纹孔加工等，在自动武器装配中也有应用。

图9-4所示为两个零件同时钻、铰孔或铣槽，可使装配方便，且降低各零件位置要求。

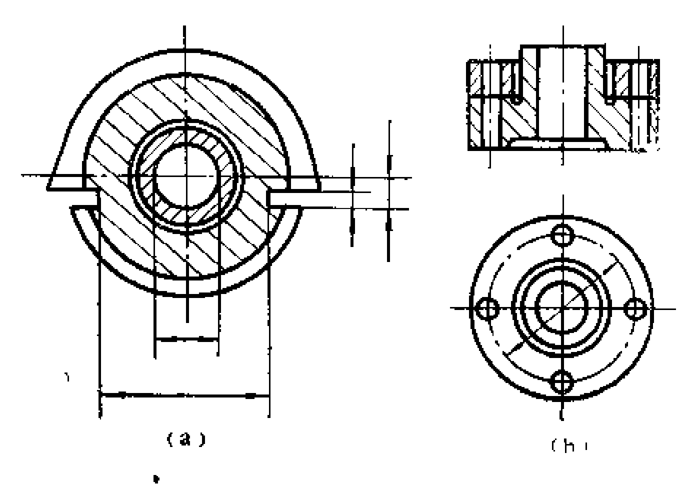


图9-4 合并加工法示例

（a）合并铣槽；（b）合并钻孔

（二） 调整法

调整法装配就是在装配时通过改变某一组成环的装配位置尺寸或加入一个（或几个）固

定调整件来达到装配精度要求的装配方法。前者称为可动调整法，后者称为固定调整法。

调整装配法仍是以扩大组成环的制造公差为基础的，但它不切除金属，而是在装配尺寸链中设置一个（或几个）组成环为调整环（也称补偿环），这是与修配法的明显区别。

1．可动调整法

可动调整法就是在尺寸链中选定一个零件为调整件，通过改变调整件的位置来达到装配精度要求的装配方法。此法在调整过程中不需要拆卸零件，所以比较方便，并且减少了装配工作量。

常用的调整件有螺纹、楔面、偏心等，例如自动武器中准星高低、左右方向的调整，平行四边形的调整，同步击发的调整，四根枪膛轴线汇交于一点的调整，齿轮啮合间隙的偏心调整，枪管与机匣的楔铁连接等；还有采用自动调整的，如56式7.62mm冲锋枪的活塞杆与枪机框之间的铰链式连接就有自动调整的作用；此外，还有径向调整，如涨圈、锥形调整等。可动调整法在汽车、拖拉机、机床等机械制造业中也有广泛应用。

2．固定调整法

固定调整法就是在尺寸链中加入一个（或几个）具有适当尺寸的零件作为调整件（该组成环称为调整环），通过选择不同尺寸的调整件来达到规定的装配精度要求的装配方法。

通常选用的调整件有垫片、套筒等简单零件，使它们成为装配尺寸链中的一个组成环，装配时，改变调整件的厚度尺寸来保证装配精度的要求。调整件的尺寸范围和规格种类是经过计算后确定的，具体计算方法可参考尺寸链原理的有关部分。

在实际生产中，为了简化垫片的规格，现广泛采用"垫片组合"的方式来满足对调整件的尺寸要求。这种方法是把垫片做成几种规格，如厚度分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5和1mm等几种，装配时根据需要把不同的垫片组合起来，以满足装配精度的要求。如需要1.9mm的垫片，可将0.4、0.5和1mm的三垫片组合起来。

但上述间隔为0.1mm的垫片，只能满足装配要求为0.1mm的装配尺寸链（略去垫片本身的制造公差）。若在上述垫片中增加0.05mm后的垫片，则可以满足装配精度要求为0.05mm的装配尺寸链。可见，最小厚度的垫片对调整装配尺寸链的装配精度有较大的影响。在生产中，最小厚度的垫片，通常是根据加工工艺的可能性和方便性来确定的。垫片的外形尺寸较大时，垫片的最小厚度要大点；垫片的外形尺寸较小时，垫片的最小厚度也小点。多数工厂的最小垫片厚度为0.05～0.1mm。

为了增加垫片的最小厚度尺寸，同时又能满足较高的装配精度要求，近来有些工厂增加了0.25mm或0.35mm的垫片规格，如将0.2、0.25、0.3、0.5和1mm的垫片组合后，能得到最小调整尺寸为0.4mm，装配精度要求为0.05mm的各级调整尺寸，从而满足了垫片容易制造和装配精度要求较高的要求。例如56式14.5mm高射机枪枪架座圈中上、下转动环的装配（图9-5），就是采用调整法，在上、下转动环之间根据需要增加0.25～2mm不同厚度的垫片组合来满足转动时轴向松动和起动力的装配技术要求。

若装配精度要求提高到0.02～0.03mm，那末单用垫片就难以满足要求了，因为制成厚度为0.02～0.03mm的垫片是比较困难的。这时可采用增加0.12或0.17mm的垫片，但由于此时垫片厚度的制造公差不可忽略，考虑到垫片的制造公差，则实际上可以调整的装配精度就比0.02～0.03mm大了。

为了保证0.02～0.03mm的装配精度，比较好的方法是采用垫片加套筒两种调整件。这种

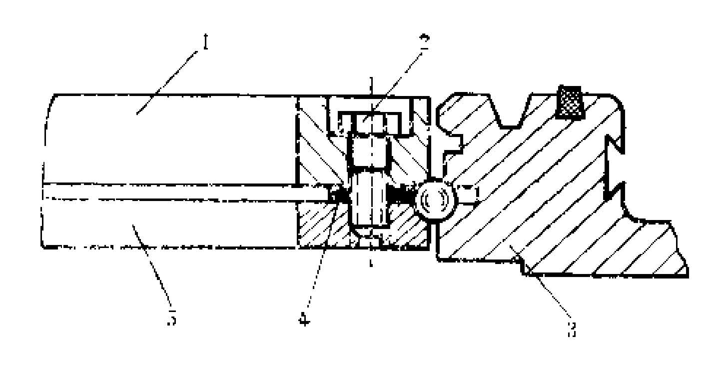


图9-5　56式14.5mm高射机枪座圈装配

1—上环；2—螺栓；3—固定环；4—垫片；5—下环

方法是把垫片做成0.3、0.4和0.5mm等几种规格，再把套筒的基本尺寸做成10～20mm之间任一值，间隔值为0.02～0.03mm的几种规格，如做成16.80、16.82、16.84、16.86、16.88mm的五种规格，调整时，把垫片和套筒组合在一起，垫片做为粗调整，套筒作为精调整，调整精度为0.02mm。由于套筒尺寸较大，在加工中可用磨削方法保证较高的尺寸精度，以满足装配精度为0.02～0.03mm的调整要求。此种垫片加套筒的调整多用在汽车、机床等机械制造业中，自动武器应用不多。

第四节　自动武器的射击试验

为了综合考核自动武器的基本性能，检查自动武器使用的可靠性和生产的稳定性，在自动武器总装配后，必须进行一系列的实弹射击试验。这些试验项目主要有：

1．闭锁强度和机构动作的灵活性试验；

2．射击精度试验；

3．互换性试验；

4．寿命试验；

5．特种试验。

其中，闭锁强度和机构动作灵活性试验，射击精度试验，是每支枪都要进行的；而互换性试验、寿命试验和特种试验则是根据技术文件的要求，在规定的时期中抽取一定数量的自动武器进行。

一、闭锁强度和机构动作的灵活性试验

自动武器进行闭锁强度试验，是为了检验其闭锁机构的强度；而机构动作的灵活性试验，则是为了检验自动武器机构动作的灵活性，以保证自动武器各机构动作的协调、灵活和工作可靠。

自动武器的闭锁强度试验和机构动作的灵活性试验是根据武器类型不同而进行的。例如56式7.62mm半自动步枪的闭锁强度试验和灵活性试验是同时进行的。试验时，用两发强装药弹（p_m=310～340MPa）和8发普通弹（p_m=280MPa）进行射击试验；63式7.62mm自动步枪的两种试验也是同时进行的，不过射弹为2发强装药弹和18发普通弹，普通弹的射击方式是单发射击8发，短点射10发，每次3～5发。其中，强装药弹射击即为闭锁强度试验，普通弹射击即为机构动作灵活性试验。而56式14.5mm高射机枪的闭锁强度试验和机构动作

灵活性试验是分别进行的，其中，用1发强装药弹（p_m=380±10MPa）射击以检验闭锁强度，而机构动作灵活性试验则包括自动机灵活试验和高射时灵活性试验两次，第一次每个枪身射击4次，每次5发，共20发弹检验平射时机构动作的灵活性；在仰角为75°～85°时，进行第二次试验，此时，每个枪身射弹50发（可进行单、连发），以检验高射时机构动作的灵活性。

自动武器经闭锁强度试验后，用弹形样柱检查枪机的闭锁情况。例如，56式7.62mm半自动步枪，对32.95mm的弹形样柱，用200N的推力推动枪机，枪机不应闭锁。同时，自动武器上的任何零件不应有裂纹、胀大及破断等缺陷，弹壳不应有粗糙的环状压痕、裂纹及破断等现象。

自动武器经机构动作灵活性试验后，射击动作应确实、可靠，不应有故障。若经过试验，达不到技术要求时，要查明故障原因，排除后再进行复试。

二、射击精度试验

自动武器的射击精度试验是评定其质量的主要指标。经闭锁强度和机构动作灵活性试验合格的自动武器，都要进行射击精度试验，以考核并校正其射击密集度（散布精度）和射击准确度（射击精度）。射击密集度是指弹着点密集的程度，一般用圆环或矩形框检查，框心与平均弹着点重合，框内的弹着数等于或多于规定的着弹点要求数为合格，射击准确度是指弹头的平均弹着点与瞄准点的偏差程度，其偏差量小于或等于规定要求的为合格。

射击精度试验时，各种自动武器射击距离不同，手枪为25m，54式冲锋枪为50m，其余自动武器均为100m。射击是在带有缓冲簧的支架或枪架上，对规定的靶板用4发枪弹作单发射击，机枪还需用8～10发枪弹作点射射击。精度合格标准参见表9-2。

若射击精度试验达不到合格标准，可根据平均弹着点距离检查点的偏差量，调整准星及准星滑座（手枪调整照门），必要时可校正枪管，再进行复试，直到合格为止。

表9-2　若干自动武器射效规则

枪名		54式7.62mm手枪	59式9mm手枪	56式7.62mm半自动步枪	56式7.62mm冲锋枪
射距（m）		25	25	100	100
表尺分划		—	—	3	3
发射弹数	单	4	4	4	4
	连	—	—	—	—
准确度（cm）	单	5	5	5	5
	连	—	—	—	—
检查环尺寸（cm）	单	φ15	φ10	φ15	φ15
	连	—	—	—	—
环内至少弹数（发）	单	3	3	3	3
	连	—	—	—	—

枪　名		56式7.62mm轻机枪	58式7.62mm轻机枪	53式7.62mm重机枪	54式12.7mm高射机枪
射距(m)		100	100	100	100
表尺分划		3	3	3	3
发射弹数	单	4	4	4	8(或4)
	连	8(2～3次点射)	10(连)	10(连)	—
准确度(cm)	单	5	3	3	3
	连	5	高低6 方向5	高低6 方向5	—
检查环尺寸(cm)	单	φ16	12×10	12×10	φ20
	连	φ20	16×14	16×14	—
环内至少弹数(发)	单	3	3	3	6(或3)
	连	6	8	8	—

三、互换性试验

自动武器互换性试验的目的，主要是检验自动武器零件及装配件制造与验收的正确性，样板的磨损及生产的一般调整。另外，规定自动武器某些零、部件有互换性，则是为了快速更换破损件，以充分发挥自动武器的威力。

根据自动武器种类的不同，互换性试验按每月、每季度或半年进行一次。试验枪从验收合格的成枪中任意抽取，每次抽10支（挺）。试验时，按技术条件规定将试验枪上的完全互换零件拆下，混合起来，不加任何选择和调整，装配成枪，应合乎订货者的验收样板和规定的技术要求，然后进行机构动作的灵活性试验，某些枪还要进行射击精度试验，试验结果应达到规定的合格要求。

四、寿命试验

自动武器的寿命通常指其能保持战斗性能不变的最多射弹发数。各种自动武器的寿命均由战术技术要求规定。

自动武器寿命试验的目的是，考核在正常使用条件下，以不同的气候和环境，试验零、部件及全枪的寿命；确定易损零件的备份量；查明自动武器寿终前保持战斗及勤务性的能力；弄清零件磨损情况及武器使用中常规的故障与排除故障的复杂程度，以便为改进结构及工艺性提供准确可靠的资料。

自动武器寿命试验一般为每季度或半年进行一次，从生产合格的成品枪中任选一支（挺）进行。寿命试验的条件和方法，通常在试验法中都有详细规定，这里仅说明其主要内容和方法。

1．试验前、后，均得检查自动武器的外观，机构动作、主要尺寸（枪膛、闭锁间隙、击针突出量、拉壳钩作用尺寸），主要零件的硬度及主要弹簧簧力等。

2．试验开始和结束时，要测量初速、自动机运动曲线，不同调速位置的理论射速，考核射击精度。射击精度通常分别射击三靶单（连）发，例如56式7.62mm半自动步枪与63式7.62mm自动步枪即采用枪刺成战斗状态射击两靶，成行军状态射击一靶，每靶各射弹20发，以测定散布精度。

3．在试验过程中，检验机构动作灵活性与工作可靠性。试验时，将试验枪置于带缓冲器的支架或枪架上，按各种自动武器规定的寿命，以其本身要求的战斗射速连续射击。每射击一定发数（例如手枪和步枪100发、冲锋枪150发、机枪200～500发、大口径机枪100发），将枪管用水冷却一次，並允许擦拭枪膛。

考核自动武器寿命的指标如下：

（1） 零件强度及闭锁间隙

自动武器寿命试验结束时，全枪零件达到规定的射弹指标，主要零件（如枪管、枪机、枪机框、机匣等）不应出现肉眼可见的裂纹，其余零件无破损；用最大弹形样柱检查不应闭锁。例如56式7.62mm半自动步枪拉壳钩及其簧为5000发，其他零件为6000发，最大弹形样柱为33.15mm。

（2） 机构动作

自动武器在寿命试验结束时，机构动作的故障率应低于规定的次数指标，一般为≤0.2～0.35%（手枪与轻机枪、重机枪较高）。比如56式7.62mm半自动步枪和63式7.62mm自动步枪的故障率规定为≤0.35%。

（3） 弹道性能

自动武器在寿命试验结束时，要求射击精度的降低不超过规定值，这些内容包括：

a） 散布圆面积增长量

散布圆面积增长量以散布圆半径R50（以平均弹着点为圆心，包含总弹着点50%的圆半径）的增大倍数表示，一般认为不超过试验前R50的2～2.5倍（冲锋枪、步枪取小值）。

b） 横弹数目增长量

横弹数目增长量以靶纸上的椭圆孔（长、短轴之比大于1.25时的弹孔）所占的百分比表示。一般认为：小口径自动武器不超过总弹着点的20%，大口径自动武器不超过总弹着点的50%。

c） 初速下降量

初速下降量是用试验前、后初速降低的相对百分数表示。一般为5～20%（口径大的取大值）。由于初速的降低直接影响到弹着情况，因此通常主要规定散布面积和横弹数目增长量，而对初速的降低量不作明文规定。

在此必须指出，上述寿命指标均是由枪管内膛变化而引起弹道性能的改变，三项指标並不同时达到。为此，应根据枪管弹道性能丧失的特点和战术技术要求来选定寿命指标。例如，手枪、冲锋枪、步枪多考核散布圆半径增长量，而机枪主要考核横弹孔比率和散布圆半径，初速下降量仅作为辅助指标。

五、特种试验

为了考核自动武器在特种条件下工作的可靠性，有的自动武器还要模仿其工作的特定环境进行一些特殊试验，如高、低温试验，淋雨试验，扬尘试验，浸河水试验，脱脂试验，冰冻试验，扬尘后淋雨综合试验，发射各种枪弹试验，各种火力试验等，到底进行哪些试验，视具体情况需要可有选择地进行，

主 要 参 考 文 献

〔1〕 顾崇衔等：“机械制造工艺学”，陕西科学技术出版社，1981。
〔2〕 哈尔滨工业大学、上海工业大学主编：“机械制造工艺理论基础”，上海科学技术出版社，1980。
〔3〕 陈懋圻：“机械制造工艺学”，辽宁科学技术出版社，1984。
〔4〕 端木时夏：“仪器制造工艺学”，机械工业出版社，1981。
〔5〕 孙健、曾庆福：“机械制造工艺学”，机械工业出版社，1982。
〔6〕 上海市大专院校机械制造工艺学协作组编：“机械制造工艺学”，福建科学技术出版社，1985。
〔7〕 李厚生：“内燃机制造工艺学”，中国农业机械出版社，1981。
〔8〕 王宝玺：“汽车拖拉机制造工艺学”，中国农业机械出版社，1981。
〔9〕 路亚衡等：“机械制造工艺学”，华中工学院出版社，1985。
〔10〕 赵志修：“机械制造工艺学”，机械工业出版社，1985。
〔11〕 武汉建筑材料工业学院编：“机械设计工艺基础”，中国建筑工业出版社，1985。
〔12〕 全国经济管理院校工业技术学研究会编：“机械制造概论”，上海科学技术出版社，1985。
〔13〕 哈尔滨工业大学、上海工业大学主编：“机械制造工艺规程制订及装配尺寸链”，上海科学技术出版社，1980。
〔14〕 王文澜、王峻、于庆魁：“武器弹药制造工艺学”，国防工业出版社，1963。
〔15〕 陶乾：“金属切削原理”，人民教育出版社，1958。
〔16〕 金属切削理论与实践编委会：“金属切削理论与实践”，北京出版社，1985。
〔17〕 卢慧玲、杨崇田译：“仪器制造中零件的工艺性”，国防工业出版社，1965。
〔18〕 周士炎译：“机器制造中加工余量的计算”，机械工业出版社，1956。
〔19〕 成熙治：“互换性原理”，黑龙江科学技术出版社，1982。
〔20〕 华中工学院标准化与计量测试教研室编：“互换性与技术测量”，华中工学院出版社，1982。
〔21〕 梁炳文译：“飞机构造工艺性指南”，第二部分，国防工业出版社，1962。
〔22〕 段扬译：“机械工业自动化”，机械工业出版社，1983。
〔23〕 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会：“机械工程手册”，第八、 五、九卷，机械工业出版社，1982。
〔24〕 机床设计手册编写组：“机床设计手册”，卷一，上册，机械工业出版社，1978。
〔25〕 王绍俊：“机械制造工艺设计手册”，机械工业出版社，1985。
〔26〕 刘晋春、陆纪培：“特种加工”，吉林人民出版社，1981。
〔27〕 集群：“电解加工”，国防工业出版社，1965。
〔28〕 魏振荪编译：“喷漆表面处理法”，大东书局出版，1954。
〔29〕 高晓枫译：“金属的氧化与磷化”，工学书店印行，1953。
〔30〕 上海轻工业专科学校：“电镀原理与工艺”，上海科学技术出版社，1978。
〔31〕 枪弹制造编写组：“枪弹热处理和表面处理”，国防工业出版社，1979。
〔32〕 关云隆：“无损检验”，国防工业出版社，1973。
〔33〕 乐总谦：“金属切削刀具”，机械工业出版社，1985。
〔34〕 华南工学院、甘肃工业大学主编：“金属切削原理及刀具设计”，上海科学技术出版社，1980。
〔35〕 中国企业管理百科全书编辑部：“中国企业管理百科全书”（上），企业管理出版社，1984。
〔36〕 李敏等译：“枪管制造”，国防工业出版社，1956。
〔37〕 王林：“武器弹药制造工艺学”，国防工业出版社，1962。
〔38〕 半自动步枪编写组：“半自动步枪”，国防工业出版社，1970。
〔39〕 步兵自动武器及弹药设计手册编写组：“步兵自动武器及弹药设计手册”，中、下册，国防工业出版社，1977。
〔40〕 兵器工业部枪械手册编写组：“枪械手册”，国防工业出版社，1986。
〔41〕 МАТАНИН А.А.：“ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ”，1977。
〔42〕 “РУКОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ”，ОБОРОНГИЗ，1954。
〔43〕 “加工技術データファイル”，4，昭和54年11月初版1刷。
〔44〕 野村俾司，“深穴あけ加工と切りくず処理”，機械技術，第28卷，第4号，昭和55年3月。
〔45〕 HALDON J. SWINEHART，“GUNDRILLING，TREPANNING，and DEEP HOLE MACHINING”，1967。